

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2023, Volume: 11 Issue: 4

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Musa YILDIZ – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürelî / 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
Bu sayıda görev alan Alan Editörleri / This number of people working	Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU – Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dündar Sofuoğlu – Dumlupınar Üniversitesi Doç. Dr. Fecir DURAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gültekin UZUN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Özer SEVİM – Kırıkkale Üniversitesi Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Semih ÖZDEN – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR – Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL – Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seda ŞAHİN – İnönü Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seyfettin VADİ – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Gazi Üniversitesi Arş. Gör. Dr. Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR – Milli Savunma Üniversitesi Öğr. Gör. Gözde ALTUNTAŞ – Gazi Üniversitesi

Sekretarya / Secretariat	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi
Teknik Editör / Technical Editor	Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi

HAKKINDA

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

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

ABOUT

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

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

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

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

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

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

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

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

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

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. Türkiye’de Farklı İklim Kuşakları İçin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Güneş Işınımının Tahmini (Araştırma Makalesi), Sevde ERTÜRK, Hakan KARA, Ceyhun AKKUŞ, Gamze GENÇ 885
2. Investigation of An Auxetic Novel Lattice Structure and Changes in Poisson’s Ratio at Different Inner Thicknesses (Araştırma Makalesi), İsmail ERDOĞAN, İhsan TOKTAŞ 893
3. Neutronic Assessment of High-Temperature Gas-Cooled Thorium Burner using Monte Carlo Calculation Method with Full Core Model (Araştırma Makalesi), Ahmet ÇİFCİ, Adem ACIR 903
4. Tekerlekli Sandalye Kullanıcılarına Yönelik Engelsiz Yaşam Alanı Projesi (Araştırma Makalesi), Nihan MUŞ ÖZMEN, Pelin ÖZÜBERK, Ayşe GÜNEŞ 913
5. The Analysis of Electron Transfer Mechanism Within Fuel Cell Systems: Electrochemical and Microbial Approaches (Araştırma Makalesi), Işıl BİLGİÇ 932
6. Plaka Kanatlı Isı Dağıtıcı Termal Performansının Deneysel Olarak Zorlanmış Konveksiyonda İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Vahit ÇORUMLU, Mesut ABUŞKA 951
7. Mobilya Tasarım Sürecinde Toplumların Kültürel Niteliklerinin Etkisi ve Özgün Türk Mobilyasının Tanınırlığının Araştırılması (Araştırma Makalesi), Önder TOSUN, Mustafa ALTUNOK, İhsan KÜRELİ, Ali KASAL 966
8. Method Development for Sustainable Product and Service Design Strategy: Polymer Products with Shell Structures (Araştırma Makalesi), Mustafa CANBULAT, Habip Akın HACIMUSALAR, Mine POYRAZ 984
9. Recycling of Spent LFP Batteries (Derleme Makalesi), Gizem AVCI, Alp ÖZDEMİR 997
10. AISI 1050 Çeliğinin Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlamanın (MMY) Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlüğü Üzerindeki Etkisinin Araştırılması (Araştırma Makalesi), Selçuk YAĞMUR 1024
11. A Novel Broadband Filtenna with using SRR and DGS for Wireless Communication Applications (Araştırma Makalesi), Galip Orkun ARICAN1, Mert KARAHAN 1035
12. Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Farklı Parametrelerle Kesilmiş Liflehanın Pürüzlülük Özelliklerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Hüseyin PELİT, Özkan YAMAN 1046
13. Examination of the Relationship between the Location of Wind Plants and the Earthquake Risk: Case Study Türkiye (Araştırma Makalesi), Anıl Özdemir, Murat Pınarlık 1055
14. The Statistical Analysis on Physical and Rheological Properties of the Bitumen Modified with CR+SBS+Sasobit (Araştırma Makalesi), Yunus ERKUŞ, Baha Vural KÖK 1068


İÇİNDEKİLER / CONTENTS

15. Investigation of the Auxetic Behavior of an Original Lattice Structure Design (Araştırma Makalesi), Nuriye Nur KAYA, Cengiz ELDEM, İhsan TOKTAŞ 1081
16. Şerit Yoğunluk Tespit ve Bilgilendirme Sistemlerinin Tasarımdan İşletmeye Genel Altyapısının Belirlenmesi: Örnek bir Sistem Tasarımı (Araştırma Makalesi), Metin Mutlu AYDIN, Başak BIYIK 1092
17. Effect of Gallium Content on Diode Characteristics and Solar Cell Parameters of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ Thin Film Solar Cells Produced by Three-stage Co-evaporation at Low Temperature (Araştırma Makalesi), Semih AĞCA, Güven ÇANKAYA 1108
18. Measurement of the Cybersecurity Strategy Effectiveness with a Scorecard Based on Risk Analysis (Araştırma Makalesi), Özlem EVRE, Bünyamin CİYLAN 1116
19. A Systematic Review of Cognitive Ergonomics and Safety: General Trends and Application Areas (Derleme Makalesi), Uğur ATICI, Aylin ADEM, Mehmet Burak ŞENOL, Metin DAĞDEVİREN 1131
20. Değişken Sayıda Delikler İçeren Emici Plakalara Sahip Güneş Enerjili Hava Isıtıcısının Sayısal Analizi (Araştırma Makalesi), Murat ÖZTÜRK, Erdem ÇİFTÇİ 1162
21. AISI 304L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağıyla Birleştirilmesinde Nitasyon İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması (Araştırma Makalesi), Mehmet ÇOBAN, Hakan ADA, Cemil ÇETİNKAYA 1171
22. Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi (Araştırma Makalesi), Semih Sadi KILIÇ, Halil İbrahim VARIYENLİ 1183
23. Optimization of Array Design in Photovoltaic Power Plants Using the Taguchi and ANOVA Analysis (Araştırma Makalesi), Oğuz Kaan ÇİNİCİ, Adem ACIR 1195
24. Elektrikli Ev Aletlerinde Müdahalesiz Yük İzleme, Sınıflandırma ve Kontrolünün Gerçekleştirilmesi (Araştırma Makalesi), Fethi Batıncan Gürbüz, Ramazan Bayındır, Seyfettin Vadi 1209
25. Hibrit-Elektrikli İtici Sistemine Sahip Cessna 172S Uçağında Uçuş Parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyonu (Araştırma Makalesi), İsmail ATA 1223
26. A Comparison of Digital Constant On-Time and Variable On-Time Control in Buck/Buck-Boost PFC Converter (Araştırma Makalesi), Zafer ORTATEPE 1232
27. Hydrogen Production using a Hybrid System Built with Renewable Energy Resources in Yenice (Araştırma Makalesi), Esra BAYIR, Halil Hakan AÇIKEL 1244

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- | | | |
|-----|---|------|
| 28. | Akü Bileşenlerinin Akü Performansına Etkilerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi),
İbrahim ÜLKE, Muhammed Ferhat ÖZTÜRK, Mustafa YURDAKUL, Yusuf Tansel İÇ | 1261 |
| 29. | Yeni Nesil Buz Makinesinin Termoelektrik Modülünün TEPASLA Araştırılması /
Investigation of Thermoelectric Module of Next Generation Ice Machine with TEPAS
(Araştırma Makalesi), Raşit AHISKA, Günay ÖMER, Büşra SAYIN | 1271 |
| 30. | Experimental Investigation of the Effects of E85 and Gasoline on NO Emission in a
Spark Ignition Engine (Araştırma Makalesi), Mustafa Ceyhun ERKOCA, Tolga
TOPGÜL | 1283 |

Türkiye’de Farklı İklim Kuşakları İçin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Güneş Işınımının Tahmini

Sevde ERTÜRK¹ , Hakan KARA² , Ceyhan AKKUŞ² , ve Gamze GENÇ^{2*} 

¹Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı 38039 Kayseri

²Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 38039 Kayseri

Article Info

Research article
Received: 26/07/2023
Revision: 18/08/2023
Accepted: 22/08/2023

Keywords

Solar Radiation
Solar Radiation Prediction
Artificial Neural Networks
MATLAB

Makale Bilgisi

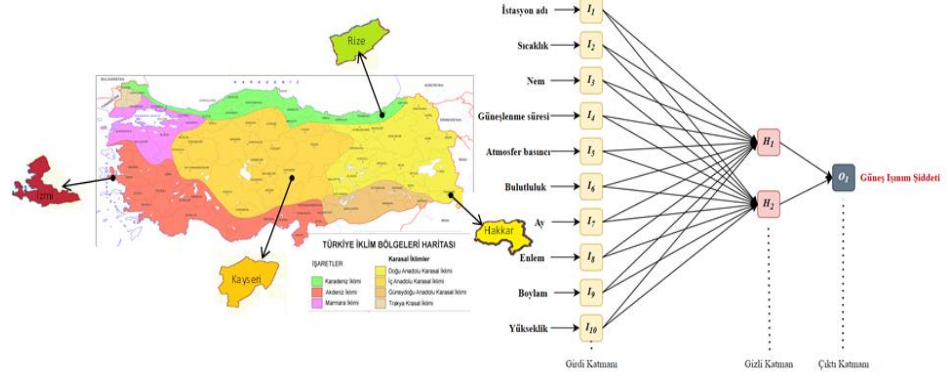
Araştırma makalesi
Başvuru: 26/07/2023
Düzeltilme: 18/08/2023
Kabul: 22/08/2023

Anahtar Kelimeler

Güneş Işınımı
Güneş Işınım Tahmini
Yapay Sinir Ağları
MATLAB

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Türkiye’nin farklı iklim kuşaklarında yer alan dört il (Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir) için MATLAB uygulamasıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli oluşturulup güneş ışınımı tahmini yapılmıştır. / In this study, an Artificial Neural Network (ANN) model was developed for solar radiation estimation by using MATLAB application for four cities (Kayseri, Rize, Hakkari, and İzmir) located in different climatic zones of Turkey.



Şekil A. Türkiye’nin farklı iklim kuşakları için YSA ile güneş ışınımı tahmini / Figure A: Solar radiation estimation with ANN for different climate zones of Turkey

Önemli noktalar (Highlights)

- Türkiye’nin farklı iklim kuşaklarında yer alan dört şehrin meteorolojik verileri ele alındı. / Meteorological data from four cities located in different climate regimes in Turkey were used.
- Solar ışınımın modellenmesi için yapay sinir ağları sunuldu. / Artificial neural networks for solar irradiation forecasting are presented.
- YSA ile tahmin edilen değerler ile ölçülen değerler uyumludur. / The values estimated with ANN were compatible with measured values.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir illerinin meteorolojik ve coğrafi verilerinden yararlanılarak güneş ışınım değerlerinin YSA kullanılarak tahmin edilmesidir. / The aim of this study is to estimate solar radiation values using ANN by using meteorological and geographical data of Kayseri, Rize, Hakkari and İzmir provinces.

Özgünlük (Originality): Türkiye’nin farklı iklim kuşakları için YSA kullanılarak güneş ışınımının tahmin edilmesi. / Estimation of solar radiation using ANN for different climate zones of Turkey.

Bulgular (Results): Geliştirilen YSA modeli ile MGM’den alınan ölçülen ışınım değerleri kıyaslandığında hesaplanan korelasyon değerlerine göre R² değerinin ele alınan her bir il için 0.9’un üzerinde olduğu görülmüştür ki bu da modelin doğruluğunu kanıtlamaktadır. / When the developed ANN model and the measured radiation values obtained from the MGM are compared, it was seen that the R² value was above 0.9 for each province, according to the calculated correlation values, which proves the accuracy of the model.

Sonuç (Conclusion): Tahmin edilen değerlerle ölçülen değerler birbiri ile uyum göstermiştir. Dört farklı iklim kuşağında çalışılması YSA modelini her koşulda doğruya en yakın sonuç vermesi yönünde eğitilmiş olup sistemin her il için doğru şekilde çalışmasına zemin hazırlamıştır. / The predicted values and the measured values were compatible with each other. Working in four different climate zones has trained the ANN model to give the closest results to the truth under all conditions and has paved the way for the system to work correctly for each province.



Türkiye’de Farklı İklim Kuşakları İçin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Güneş Işınımının Tahmini

Sevde ERTÜRK¹, Hakan KARA², Ceyhan AKKUŞ², ve Gamze GENÇ^{2*}

¹Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı 38039 Kayseri

²Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 38039 Kayseri

Öz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/07/2023
Düzeltilme: 18/08/2023
Kabul: 22/08/2023

Anahtar Kelimeler

Güneş ışınımı
Güneş ışınım tahmini
Yapay sinir ağları
MATLAB

Güneş enerjisinden gerek termal gerekse elektrik uygulamalarında elde edilen faydalı enerji yüzeye gelen ışınımına bağlıdır ve bu ışınım miktarı konum, zaman, iklimsel koşullar ve çevre koşullarına göre değişmektedir. Güneş enerji destekli enerji sistemlerinin etkin bir şekilde tasarlanması ve çalıştırılması için ışınım miktarının doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada Türkiye’nin farklı iklim kuşaklarında yer alan dört il (Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir) için MATLAB uygulamasıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli oluşturulup güneş ışınımı tahmini yapılmıştır. Güneş ışınımı tahmini yapılırken illerin enlem, boylam ve rakımdan oluşan coğrafik verilerinin etkisinin yanı sıra ortalama sıcaklık, bağıl nem, bulutluluk indeksi ve atmosfer basıncı gibi meteorolojik verilerin etkisi de ele alınmıştır. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında kurulan modelde en iyi tahminleme sonucu $R^2=0.93$ değeriyle Hakkari ilinde olup sırasıyla İzmir, Kayseri ve Rize illeri takip etmektedir. Her bir il için YSA ile tahmin edilen değerler ile ölçülen değerler arasında uyum olduğu görülmüştür.

Estimation of Solar Radiation Using Artificial Neural Network for Different Climate Zones in Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/07/2023
Revision: 18/08/2023
Accepted: 22/08/2023

Keywords

Solar radiation
Solar radiation prediction
Artificial neural networks
MATLAB

Abstract

The useful energy obtained from solar energy in both thermal and electrical applications depends on the radiation coming to the surface and the amount of this radiation varies according to location, time, climatic conditions, and environmental conditions. Determination correctly way of the amount of radiation is important for the efficient design and operation of solar-powered energy systems. In this study, an Artificial Neural Network (ANN) model was developed for solar radiation estimation by using MATLAB application for four cities (Kayseri, Rize, Hakkari, and İzmir) located in different climatic zones of Turkey. While estimating solar radiation, the effect of the geographical data of the cities consisting of latitude, longitude, and altitude, as well as the effect of meteorological data such as average temperature, relative humidity, cloudiness, and vapor pressure are also discussed. Considering all these factors, the best estimation result in the model established is Hakkari with $R^2=0.93$, followed by İzmir, Kayseri, and Rize cities, respectively. For each city, it was seen that there was a correspondence between the values estimated by ANN and the measured values.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların da tükenmeye yüz tutması sebebiyle oluşan iklim krizi bütün dünya ülkelerinde önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu durum temiz, doğal, sonsuz ve sürekli enerji arayışını doğurmuş ve yenilenebilir enerjiye yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji kullanımı aynı zamanda karbon emisyonuna olumlu katkı sağladığı için ülkelere tercih edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise güneş enerjisi en çok tercih edildir.

Güneş enerjisinden kolektörler ile sıcak su ve paneller ile elektrik üretilebildiği için kullanım alanı geniş bir yelpazeye sahiptir. Güneş enerjisinin gerek ısı uygulamalarında gerekse elektriksel uygulamalarında elde edilen faydalı enerji ve elektrik miktarı yüzeye gelen güneş ışınımına bağlıdır. Bu ışınımı etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler güneş ışınları geliş açısı, tarih ve bulutluluk indeksi gibi parametrelerdir. Kapalı (bulutlu) havalarda dahi güneş ışınları yeryüzüne ulaştığı için Güneş’ten enerji elde edilebilir. Güneş enerji destekli enerji sistemlerinin etkin bir şekilde

tasarlanması ve çalıştırılması için yüzeye gelen ışınım miktarının doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir.

Güneş ışınımının modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu modellemelerin genelinde enlem, boylam ve rakım gibi coğrafik verilerin yanında sıcaklık, nem, atmosfer basıncı ve güneşlenme süresi gibi meteorolojik parametreler incelenmiştir. Buna bağlı olarak gerek günlük gerek de aylık güneş ışınım değerleri tahminlemesi yapılmıştır. Güneş ışınımın Yapay Sinir Ağları (YSA) ile tahmin edilmesinde gerek ülkemizde gerek dünyada farklı lokasyonlar için yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır. Şahan [1] çalışmasında Akdeniz bölgesinin doğusundan seçilen Gaziantep, Antakya ve Kahramanmaraş bölgeleri için aylık ortalama güneşlenme süresi, sıcaklık, bağıl nem ve güneş deklinasyon açısı parametrelerine bağlı olarak yatay yüzeydeki aylık ortalama global güneş ışınımını tahmin etmek için YSA modelini kullanmıştır. YSA modelindeki ağı eğitilmesi Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MGM) veriler alınmıştır. Tahmin modelinde beş farklı Angström-Preccott tipi regresyon modeli geliştirilmiştir. YSA'dan ve Angström-Preccott tipi denklemlerden tahmin edilen veriler ile ölçülen veriler R^2 , RMSE, MAPE ve MSE gibi dört farklı istatistiksel yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. YSA metodu kullanılarak Burdur ili için güneşlenme değerlerini ise Kılıç ve Kumaş [2] tahmin etmişlerdir ve çalışmada korelasyon katsayısı 0.99746 olarak bulunmuştur. Güleç ve Demirel'in çalışmalarında [3] Kastamonu iline ait 2009-2016 yılları arasında MGM'nin ölçtüğü aylık bulutluluk indeksi, nispi nem, aylık ortalama hava basıncı, sıcaklık, güneşlenme süresi, rüzgâr hızı ve aylık toplam güneş ışınım şiddeti değerleri kullanılarak YSA ile aylık toplam güneş ışınımı şiddeti tahmin edilmiştir. Çevik ve ark. [4] çalışmalarında fotovoltaiik sistemlerin yoğun olduğu bir elektrik şebekesinde güneş enerjisinin kesintili ve değişken olması nedeniyle yük planlaması yapılmasını vurgulamıştır. Bu çalışmada sebep sonuç ilişkisi temelli YSA tasarlanarak Trabzon ili için gün öncesi 24 saatlik güneş ışınım tahmini yapılmıştır. Daha doğru tahmin yapmak amacıyla benzer gün seçimi algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar tasarlanan ağı Trabzon gibi yoğun bulutlu ve yağışlı hava şartlarına sahip bir yer için kabul edilebilir hata ile tahmin yaptığını ortaya koymuştur. Türkiye'deki 53 farklı lokasyon için günlük güneş radyasyon tahmini için bir YSA modeli ise Kuncan ve Şahin [5] tarafından geliştirilmiştir. YSA modelinin girdi değerleri olarak yeryüzü sıcaklığı, yükseklik, enlem, boylam ve aylık ışınım değerleri ve çıktı

verisi güneş radyasyonudur. Geliştirilen en iyi modele ait RMSE, MBE ve korelasyon katsayısı sırasıyla 1.550 MJ/m^2 , -0.172 MJ/m^2 ve 0.972 olarak hesaplanmıştır. Sözen ve ark. [6] çalışmalarında YSA kullanarak Türkiye'deki güneş enerjisi potansiyelini belirlemiştir. Ağda ölçekli eşlenik gradyan (SCG), Pola-Ribiere eşlenik gradyan (CGP) ve Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritmaları ve bir lojistik sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Yapay sinir ağını eğitmek için eğitim (11 istasyon) ve test (6 istasyon) verileri olarak Türkiye geneline yayılmış 17 istasyondan (yani şehirlerden) son 3 yıla (2000–2002) ait meteorolojik veriler kullanılmıştır. Piranometre ile ölçülen güneş ışınım verilerini ve meteorolojik verileri kullanarak Nisan 2017- Mart 2018 tarihleri aralığında Mersin ili için YSA modeli Arslan ve ark. [7] tarafından oluşturulmuş ve günlük toplam global güneş ışınım değerlerini tahmin etme performansı incelenmiştir. En iyi tahmin performansını incelenen modeller içerisinde belirlilik katsayısı (R^2) 0.83 olan Model 37 göstermiştir. Yeşilbudak ve ark. [8] Ankara ili için polinom, Gauss ve Fourier olmak üzere üç farklı ampirik metot kullanarak uzun dönem global güneş ışınım şiddeti, güneşlenme süresi ve hava sıcaklığı verilerini modellemiştir. Belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata istatistiksel test ölçekleri hesaplanan ampirik metotların veri modelleme performansları kıyaslanmıştır.

Oyewola ve ark. [9] çalışmalarında, YSA kullanarak Fiji'deki tüm konumlardaki ortak meteorolojik ve coğrafik verilerden Fiji'nin yeryüzündeki radyasyonunu belirlemiştir. Bu çalışmada veri boyutu, hesaplama hızı ve bu algoritmaların güneş radyasyonu modellemesindeki başarısı nedeniyle öğrenme algoritmaları olarak Levenberg-Marquardt (LM) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG) seçilmiştir. YSA, ağı eğitmek için girdi verilerine ihtiyaç duyduğundan, NASA veri tabanından coğrafi veriler ve 36 yılı (1984–2019) kapsayan meteorolojik veriler ağa gönderilmiştir. Ele alınan tüm konumlar, Fiji boyunca eşit olarak dağılmıştır. Böylece Fiji'deki dört bölgeyi ve 14 vilayeti de kapsamaktadır. Ağı eğitmek için kullanılan coğrafik ve meteorolojik veriler; ay, enlem, boylam, rakım, ortalama sıcaklık, bağıl nem, yağış ve güneş radyasyonudur. Farklı öğrenme algoritmaları kullanılarak Tamil Nadu için saatlik ortalama güneş ışınımın YSA ile tahminlemesi Geetha ve ark. [10] tarafından yapılmıştır. Çalışmada üç farklı geri yayılım algoritması kullanılarak iki farklı YSA eğitilmiş ve test edilmiştir. Eğitim için Vellore dışındaki tüm ilçelerin veri kümeleri dikkate alınırken, oluşturulan YSA'nın test edilmesi için Vellore'ye karşılık gelen

veri kümesi dikkate alınmıştır. Tüm ilçelerden elde edilen veri setinin %80'i eğitim için, kalan %20'si ise test için kullanılmıştır. İstatistiksel hata analizine göre, YSA tahmini saatlik güneş radyasyonu seviyeleri çoğu istasyon için ölçülen değerlere yakın çıkmıştır. İzgi ve ark. [11] küçük ölçekli bir PV paneli için farklı zaman aralıklarında güneş enerjisi tahminini ele almıştır. Genel uygulamalarda veri gösterimi, planlama ve tahmin için 10 dakikalık veya 1 saatlik zaman aralıkları kullanılır, ancak bu çalışmada zaman aralığının saatlik, günlük ve aylık gibi zamana göre değiştiği kanıtlanmıştır. Fadare [12] çalışmasında Nijerya'daki güneş enerjisi potansiyelinin tahmini için farklı mimariye sahip standart çok katmanlı, ileri beslemeli, geri yayımlı sinir ağları tasarlamıştır. Al-Shamisi ve ark. [13] çalışmalarında küresel güneş radyasyonunun tahmini için bir sinir ağı tekniğini tanıtmıştır. 1971'den beri radyasyon verilerinin ve güneşlenme süresi bilgilerinin toplandığı Suudi Arabistan krallığının her yerine yayılmış 41 radyasyon veri toplama istasyonu bulunmaktadır. Test verileri, sistemin bilinmeyen konulardaki performansının bir göstergesini vermek için modellemede kullanılmıştır. Sonuçlar, güneş radyasyonunun mekânsal modellemesi için bu yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermiştir.

Tüm bu çalışmalar kapsamında dünyanın her yerinde güneş ışınımı değerinin ölçülebilmesi meteorolojik tahminler, tarımsal çalışmalar ve

mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak birçok istasyon bu yönden eksik kalmaktadır. Bu sebeple güneşlenme süresi, sıcaklık, nem gibi daha kolay hesaplanabilir değerler kullanılarak güneş ışınım değerleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada Türkiye'nin farklı iklim kuşaklarında yer alan dört il (Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir) için güneş ışınımının tahmini için MATLAB programı yardımıyla bir YSA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model de hem bir çok coğrafi veri hem bir çok meteorolojik veri girdi olarak kullanılarak modelin doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir.

2.MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada Türkiye'deki farklı iklim kuşaklarında yer alan güneş enerjisi bakımından farklı etkilenen illerin (Kayseri, İzmir, Hakkari, Rize) meteorolojik ve coğrafi verilerinden faydalanılarak güneş ışınım şiddeti tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Ele alınan meteorolojik veriler günlük olarak güneşlenme süresi, sıcaklık, nem, bulutluluk indeksi, atmosfer basıncı, güneşlenme şiddeti gibi değerler iken coğrafi veriler ise enlem, boylam, rakım gibi değerlerdir. Çalışmada ele alınan şehirlerin iklim kuşağı haritasındaki yerler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Türkiye iklim haritasında seçilen illerin yeri (The location of selected cities in Turkey climate map)

2.1. Veriler (Data)

Güneş ışınım tahmin modelleri arasında en sık kullanılan yöntemlerden birisi YSA'dır ve bu yöntemde kullanılan veriler ise genellikle meteorolojik ve coğrafi veriler olmaktadır. Bu çalışmada Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir illerinin güneş ışınımının tahmin edilmesinde 2012 ve 2021 yılları arası ölçülen coğrafi ve meteorolojik veriler

kullanılmıştır. Kullanılan ortalama sıcaklık, bağıl nem, bulutluluk indeksi ve atmosfer basıncı parametreleri Weather Spark sitesinden ve güneşlenme süresi ise MGM'den alınmıştır. Bu çalışma kapsamında güneş ışınım tahmin modeli oluşturmak için her bir yılın her bir ayındaki değerler veri olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verilerin çok fazla olması nedeniyle

Tablo 2’de her bir il için sadece 10 yıllık değerlerin ortalaması verilmiştir. Tablo 1’de Kayseri, Rize, İzmir ve Hakkari illeri için coğrafik veriler gösterilirken Tablo 2’de ise meteorolojik veriler verilmiştir.

Tablo 1. Ele alınan illerin coğrafik verileri (Geographical data of considered cities)

Şehir	Enlem	Boylam	Rakım(m)
Kayseri	35.8720°D	38.5515°K	1054
Hakkari	44.0355°D	37.4070°K	1950
Rize	40.8545°D	40.9165°K	6
İzmir	27.3760°D	38.6365°K	2

Tablo 2. Ele alınan illerin meteorolojik verileri (^aKayseri, ^bRize, ^cHakkari, ^dİzmir) (Meteorological data of the considered cities (^aKayseri, ^bRize, ^cHakkari, ^dİzmir))

Parametre	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ortalama Sıcaklık [°C]	0.2 ^a	2.7	6.6	10.9	15.5	20.7	22.7	21.9	17.4	12.0	5.0	1.6
	9.2 ^b	8.9	10.0	13.0	17.4	21.9	24.2	24.2	21.6	17.3	13.9	11.0
	1.4 ^c	2.3	7.0	12.6	17.7	22.3	24.6	23.3	18.8	13.0	6.3	1.8
	7.4 ^d	8.6	11.5	15.3	20.6	25.1	28.2	27.8	23.6	17.6	12.7	9.2
Nem [%]	0	0	0	0	1.4	4.2	10.6	8.8	2.2	0	0	0
	0	0	0	0	2.4	8.0	43.2	46.9	11.9	1.4	0	0
	0	0	0	0	0	1	3	2.2	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1.1	3.8	5.9	2.2	0	0	0
Güneşlenme Süresi [dk]	583	648.5	721.5	780	850.5	882	868.5	817.5	750	673.5	603	567
	592.5	652.5	720	792	855	885	870	747.5	745.5	667	600	580
	595	637.5	712.5	780	852	892.5	873	828	745.5	691	607.5	582
	592.5	652.5	720	792	855	885	885	747.5	745.5	667.5	600	580.5
Atmosfer Basıncı [mbar]	1016	1016	1015	1013	1011	1011	1013	1014	1017	1019	1019	1019
	1016	1019	1015	1016	1014	1015	1009	1011	1015	1019	1020	1018
	1018	1016	1014	1015	1014	1013	1010	1014	1016	1021	1022	1016
	1015	1017	1013	1011	1012	1011	1007	1008	1013	1014	1016	1013
Bulutluluk indeksi	48	48.4	43.8	40.4	30.5	12.8	2.2	2.8	13.3	30.2	43.6	48
	58.7	59.6	56.7	52	40.4	23.4	9	6.2	27.9	44.1	55.4	56.8
	40.2	40.9	41.3	40	28.3	9.5	1.6	2.3	8.5	25.8	39.6	40.8
	44.5	41.5	40.1	35.4	27.7	10.5	1.8	2.6	14.5	27.1	39.6	44.5

2.2. Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Güneş Işınım Şiddetinin Tahmini (Estimation of Solar Radiation Using Artificial Neural Network)

Bu çalışmada MATLAB programı kullanılarak Kayseri, Hakkari, Rize ve İzmir illerinin aylık güneş ışınım şiddeti YSA ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2’de YSA modeli gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sıcaklık, atmosfer basıncı, nem, bulutluluk indeksi, güneşlenme süresi, enlem, boylam, rakım, istasyon adı ve aylar olmak üzere 10 tane girdi katmanı bulunmaktadır ve bu katmanlarda ise toplam 636 adet veri ele alınmıştır. Bu verilerin %50’si eğitim, %25’i test ve %25’i doğrulama (validation) olarak kullanılmıştır. Çıktı katmanında ise hedef veri olarak ise yalnızca bir yılın güneş ışınım şiddeti kullanılmıştır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,\bar{o}} - H_{i,h})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,\bar{o}} - \bar{H}_{i,h})^2} \quad (1)$$

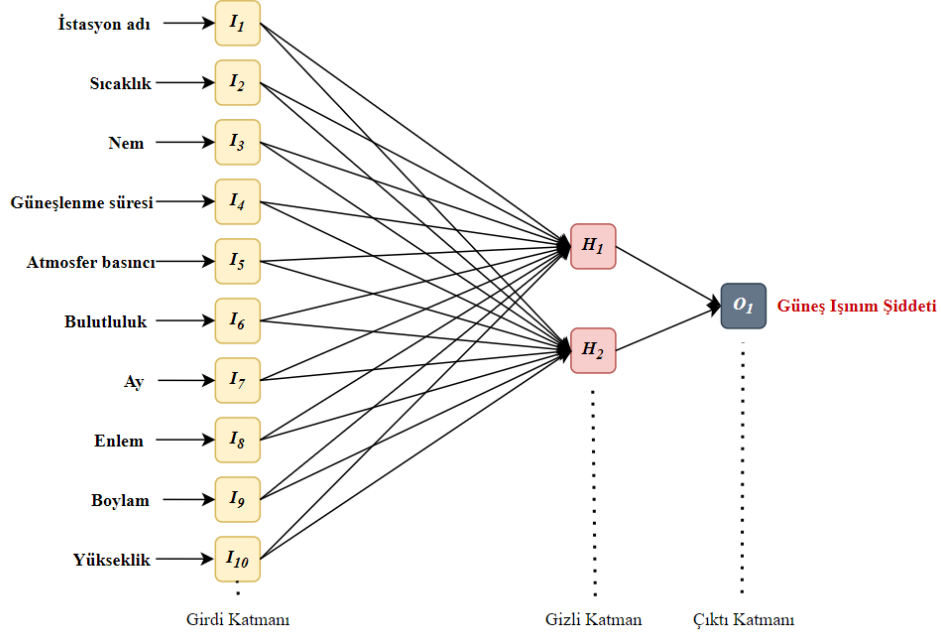
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,\bar{o}} - H_{i,h})^2} \quad (MJm^{-2}g^{-1}) \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(H_{i,\bar{o}} - H_{i,h})}{H_{i,\bar{o}}} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,\bar{o}} - H_{i,h})^2 \quad (MJm^{-2}g^{-1}) \quad (4)$$

Burada, $H_{i,\bar{o}}$ and $H_{i,h}$ sırasıyla i . ölçülen ve modellerden hesaplanan güneş ışınım değerlerini göstermektedir [$MJm^{-2}g^{-1}$]. Daha iyi veri modelleme sonuçları için, istatistiksel hata parametrelerinin sıfıra yakın olması gerekir. Modellerin performansını tahmin etmek için genellikle R^2 ifadesi kullanılmaktadır. 0 ile 1 arasında değeri olan R^2 değeri’nin 1’e yakın olması model tahminleri ile gerçek değerleri arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. RMSE ve MSE değerleri sıfıra ne kadar yakınsa mutlak sapma açısından bir modelin

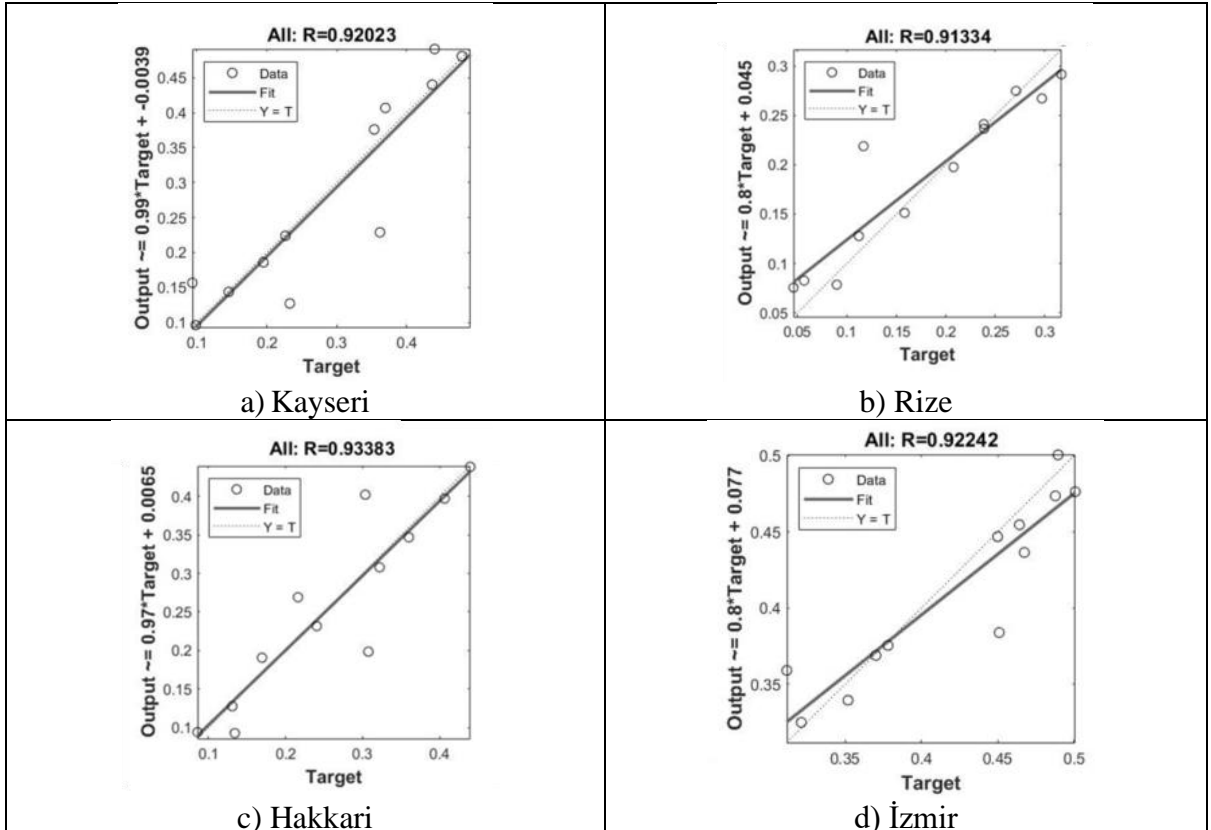
tahminleme yeteneği o kadar iyidir. Modelin performansını etkileyen değer MAPE'nin de sıfıra yakınlığı önemlidir.



Şekil 2. Güneş ışınım şiddetinin Yapay Sinir Ağı modeli (Artificial Neural Network model of solar radiation)

Şekil 3'te ele alınan dört il için gerçekleştirilen YSA modelinde elde edilen korelasyon grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerden kullanılan verilerin

tahminleme üzerindeki etkisi rahat bir şekilde gözlemlenip durum değerlendirmesi yapılabilir.



Şekil 3. YSA korelasyon grafikleri (ANN correlation graphs)

3.BULGULAR (RESULTS)

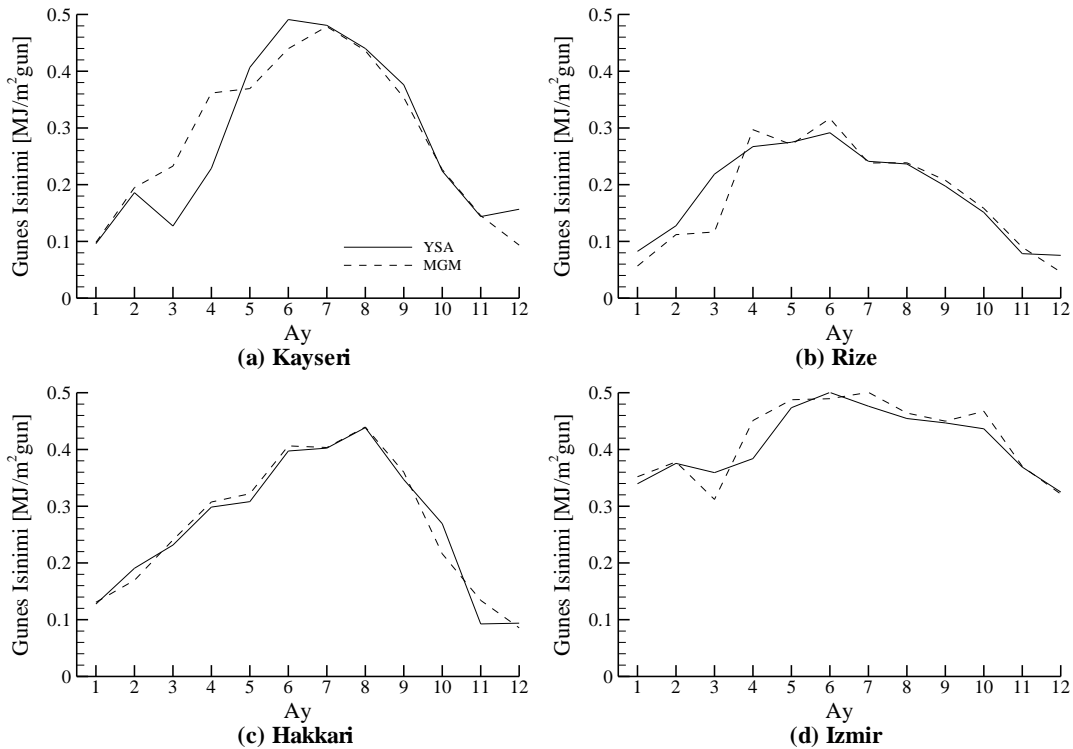
Çalışma kapsamında iklimin tahminleme üzerinde etkisini de dahil etmek için farklı iklim kuşaklarında yer alan Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir illerinin meteorolojik ve coğrafik verilerinden yararlanılarak güneş ışınım değerleri YSA kullanılarak tahmin edilmiştir. Ele alınan dört il için geliştirilen YSA modeli ile MGM'den alınan ölçülen ışınım değerleri kıyaslandığında hesaplanan korelasyon değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Korelasyon sonuçlarına bakıldığında R^2 değerinin ele alınan her il için 0.9'un üzerinde olduğu görülmüştür ki bu da geliştirilen YSA modelinin uygun olduğunu göstermektedir. Ele alınan her il içinde değerin 1'e yakın olması YSA modelinin her koşulda doğruya en yakın sonuç vermesi yönünde eğitilmiş olduğunu göstermektedir. Dört il içerisinde ise R^2 değerinin 1'e en yakın olduğu il Hakkari olarak

görülmektedir. Bulutluluk indeksi ve nem oranının düşük olmasından dolayı tahminlemenin diğer illere göre daha iyi sonuç verdiği düşünülmektedir. Bu bilgi ışığında MSE, RMSE ve MAPE değerleri de tahminlemenin daha iyi olduğunu belirtmektedir. En düşük tahminleme yeteneği ise Rize ili için söz konusudur.

Çalışmada yapılan modelleme ve korelasyon hesaplamaları ışığında Şekil 4'te, kullanılan girdilerden gerçeğe çok yakın tahminleme yapılabildiğini grafiksel olarak göstermektedir. Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir illeri için YSA'nın tahmin ettiği ortalama aylık güneş ışınım değeri ile MGM'nin ölçtüğü ışınım değerleri kıyaslandığında her ikisinin yakınlığı açıkça gözlemlenmektedir. Özellikle Hakkari ilinde çok az bir hata payı ile beklenen değerler tahmin edilmiştir.

Tablo 4. Korelasyon değerleri (Correlation values)

	Kayseri	Rize	Hakkari	İzmir
R^2	0.92023	0.91334	0.93383	0.92242
RMSE	0.6759	0.654	0.6965	0.6765
MAPE [%]	4.93	5.86	4.67	4.95
MSE	0.476	0.543	0.4568	0.467



Şekil 4. Ele alınan her bir il için YSA ile elde edilen güneş ışınım değerlerinin ölçülen gerçek değerlerle karşılaştırılması (Comparison of solar radiation values obtained from ANN with actual measured values for each considered city)

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Kayseri, Rize, Hakkari ve İzmir illerinin meteorolojik ve coğrafik verilerinden yararlanılarak güneş ışınım değerleri YSA kullanılarak tahmin edilmiştir. Farklı iklim kuşaklarından iller ele alınarak iklimin etkisi de çalışmada açıkça gözler önüne serilmiştir. Özellikle iklimin tahminleme üzerinde etkisini de dahil etmek için nem, atmosfer basıncı ve sıcaklık gibi meteorolojik veriler girdi olarak kullanılmıştır. Tahmin edilen değerlerle ölçülen değerler birbiri ile uyum göstermiştir. Dört farklı iklim kuşağında çalışılması YSA modelini her koşulda doğruya en yakın sonuç vermesi yönünde eğitmiş olup sistemin her il için doğru şekilde çalışmasına zemin hazırlamıştır. Tüm bu veriler ışığında yüksek bir hassasiyet ile çalışılıp doğruluğu test edilmiş ve YSA metodunun güneş ışınım değerlerinin tahmin edilmesinde veya benzer çalışmalarda başarılı bir şekilde kullanılabilceği gözlemlenmiştir. Çalışmadaki tahmin edilen rakamların doğruluğu gelecek yıllarda yapılacak çalışmalar için kılavuz niteliği taşımaktadır.

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)

Sevde ERTÜRK: Verilerin analiz edilmesi, YSA ile modelleme ve makalenin yazımına katkı sağlama.

Analysis of the data, modelling by using ANN, and She conducted the experiments, analyzed the results and contributing to the writing of the article.

Hakan KARA: Verileri toplama ve analiz etme.

Collecting and analysis of the data.

Ceyhan AKKUŞ: Verileri toplama ve analiz etme.

Collecting and analysis of the data.

Gamze GENÇ: Verilerin analiz edilmesi, yapay sinir ağları ile modellenmesi ve makalenin yazımına katkı sağlama.

Analysis of the data, modelling by using ANN, and She conducted the experiments, analyzed the results and contributing to the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Şahan M., Yapay Sinir Ağları ve Angström-Prescott Denklemi Kullanılarak Gaziantep, Antakya ve Kahramanmaraş İçin Global Güneş Radyasyonu Tahmini. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 16 (2021) 368-384.
- [2] Kılıç B., Kumaş K., Burdur İli Güneşlenme Değerlerinin Yapay Sinir Ağları Metodu İle Tahmini. Teknik Bilimler Dergisi, 6 (2016).
- [3] Güleç H.G., Demirel H., Meteorolojik Veriler Kullanılarak Kastamonu İli Güneşlenme Şiddetinin Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. Technological Applied Sciences, 12 (2017) 114-121.
- [4] Çevik S., Cakmak R., Altas İ., A Day Ahead Hourly Solar Radiation Forecasting by Artificial Neural Networks: A Case Study for Trabzon Province. In 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), (2017) 1-6.
- [5] Kuncan F., and Şahin M., Yapay Sinir Ağı ve Uydu Dataları Kullanılarak Güneş Radyasyonunun Tahmini, International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), (2017) 1-10.
- [6] Sözen A., Arcaklıoğlu E., Özalp M., Kanit E.G., Use of Artificial Neural Networks for Mapping of Solar Potential in Turkey. Applied Energy, 77 (2004) 273-286.
- [7] Arslan G., Bayhan B., Yaman K., Mersin / Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 7 (2019) 80-96.
- [8] Yeşilbudak M., Çolak M., Bayındır R., Ankara İlinin Uzun Dönem Global Güneş Işınım Şiddeti, Güneşlenme Süresi ve Hava Sıcaklığı Verilerinin Analizi ve Eğri Uydurma Metotlarıyla Modellenmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6 (2018) 189-203.
- [9] Oyewola O.M., Ismail O.S., Olasinde M.O., ve Ajide O.O., Yapay Sinir Ağı Yaklaşımı Kullanılarak Fiji'deki Güneş Enerjisi Potansiyelinin Haritalanması. Heliyon, 8 (2022).
- [10] Geetha A., Santhakumar J., Sundaram, K.M., Usha S., Theentral T.T., Boopathi, C.S., Sathyamurthy R., Prediction of hourly solar

radiation in Tamil Nadu using ANN model with different learning algorithms. *Energy Reports*, 8, (2022) 664-671.

[11] Izgi E., Öztopal A., Yerli B., Kaymak M.K., Şahin, A.D., Short–Midterm Solar Power Prediction by Using Artificial Neural Networks. *Solar Energy*, 86 (2012) 725-733.

[12] Fadare D.A., Modelling of Solar Energy Potential in Nigeria Using an Artificial Neural

Network Model. *Applied Energy*, 86 (2009) 1410-1422.

[13] Al-Shamisi M., Assi A., Hejase H., Estimation of Global Solar Radiation Using Artificial Neural Networks in Abu Dhabi City, United Arab Emirates. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136 (2014).

Investigation of an Auxetic novel lattice structure and changes in Poisson's ratio at different inner thicknesses

İsmail ERDOĞAN^{1*} , İhsan TOKTAŞ² 

¹Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ (TUSAS) (TAI - Turkish Aerospace Industries, Inc.), Ankara, Turkey

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 19/08/2023
Revision: 12/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Auxetic
Negative Poisson's ratio
Lattice structure
Novel auxetic structure

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/08/2023
Düzeltilme: 12/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Auxetic
Negatif Poisson oranı
Kafes yapı
Yeni auxetic yapı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the Poisson ratio of the newly designed Auxetic lattice structures with 10 different geometry inner thicknesses was examined using finite element analysis. / Bu çalışmada, yeni tasarlanan 10 farklı geometri iç kalınlığına sahip Auxetic kafes yapıların Poisson oranı sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir.

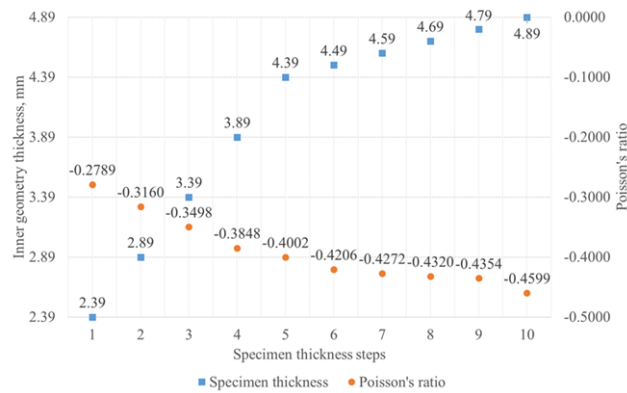


Figure A: Results of Poisson's ratio of examined specimens with respect to inner geometry thickness / Şekil A: İncelenen numunelerin iç geometri kalınlığına göre Poisson oranının sonuçları

Highlights (Önemli noktalar)

- A new auxetic unit geometry, which is not in the literature, has been designed and modeled. / Literatürde olmayan yeni bir auxetic birim geometri tasarlanmış ve modellenmiştir.
- All examined structures have negative Poisson's ratio. / İncelenen tüm yapıların negatif Poisson oranına sahiptir.
- When the geometry inner thickness is increased in the studied auxetic structures, the Poisson's ratio values approach -1. / İncelenen auxetic yapılarda geometri iç kalınlığı artırıldığında, Poisson oranı değerleri -1'e yaklaşmıştır.

Aim (Amaç): This study aims to design and analyze new Auxetic structure for literature and application area. / Bu çalışmanın amacı, literatür ve uygulama alanı için yeni Auxetic yapı tasarlamak ve analiz etmektir.

Originality (Özgünlük): In this study, a newly designed Auxetic structure that is not in the literature was examined and brought into the literature. / Bu çalışmada literatürde olmayan yeni tasarlanmış bir Oksetik yapı incelenerek literatüre kazandırılmıştır.

Results (Bulgular): Poisson's ratio value was found to be -0.4599 in the auxetic structure with a geometry inner thickness of 4.89 mm determined in the 10th step. / 10. adımda belirlenen geometri iç kalınlığı 4,89 mm olan oksetik yapıda Poisson oran değeri -0,4599 olarak bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): Within the scope of this study, unlike the auxetic structures in the literature, this unit geometry, which designed using the principles of Islamic geometric patterns and is unique in the literature, were studied. Study results showed that the auxetic structure with a highest geometry inner thickness has the lowest Poisson's ratio. The Poisson ratios of the newly designed oxetic structure were compared with the auxetic structures in the literature. / Bu çalışma kapsamında literatürdeki auxetic yapıların aksine islami geometrik desenler ilkeleri kullanılarak tasarlanan ve literatürde benzersiz olan bu birim geometri incelenmiştir. Çalışma sonuçları, geometrisi en yüksek iç kalınlığına sahip auxetic yapının en düşük Poisson oranına sahip olduğunu göstermiştir. Literatürde yer alan auxetic yapılar ile yeni tasarlanan auxetic yapının Poisson oranları karşılaştırılmıştır.



Investigation of an Auxetic novel lattice structure and changes in Poisson's ratio at different inner thicknesses

İsmail ERDOĞAN^{1*} , İhsan TOKTAŞ² 

¹Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ (TUSAS) (TAI - Turkish Aerospace Industries, Inc.), Ankara, Turkey

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 19/08/2023
Revision: 12/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Auxetic
Negative Poisson's ratio
Lattice structure
Novel auxetic structure

Abstract

Poisson's ratio, one of the most important mechanical characteristics of materials and structures, is positive for almost all of the known materials and structures. However, auxetic materials or structures have negative Poisson's ratios. Auxetic structures characteristics are very important to be used in design of a new structure. Number of computational or experimental studies on auxetic structures have been increasing in literature. In this study, a new auxetic lattice structure with different Poisson's ratios was designed and studied by finite element analysis. Mechanical properties of the newly designed auxetic lattice structures were analyzed with different lattice inner thicknesses. Results showed that changes in inner thickness affect the Poisson's ratio, mass, volume and surface area of the newly designed Auxetic lattice structures.

Yeni bir Auxetic kafes yapısının ve farklı iç kalınlıklarda Poisson oranındaki değişimlerin incelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/08/2023
Düzeltilme: 12/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Auxetic
Negatif Poisson oranı
Kafes yapı
Yeni auxetic yapı

Öz

Malzeme ve yapıların en önemli mekanik özelliklerinden biri olan Poisson oranı, bilinen malzeme ve yapıların neredeyse tamamı için pozitifdir. Ancak auxetic malzemeler veya yapılar negatif Poisson oranlarına sahiptir. Yeni bir yapının tasarımında auxetic yapıların özellikleri çok önemlidir. Literatürde auxetic yapılar üzerine hesaplamalı veya deneysel çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Bu çalışmada, farklı Poisson oranlarına sahip yeni bir auxetic kafes yapısı tasarlanmış ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Yeni tasarlanan auxetic kafes yapılarının mekanik özellikleri farklı kafes iç kalınlıklarıyla analiz edildi. Sonuçlar, iç kalınlıktaki değişikliklerin yeni tasarlanan Auxetic kafes yapılarının Poisson oranını, kütlelerini, hacmini ve yüzey alanını etkilediğini gösterdi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Poisson's ratio, one of the most mechanical characteristics of the structures, is the ratio of lateral strain to longitudinal strain at an axial tension. Poisson's ratio could be positive or negative. Structures with negative Poisson's ratios are called auxetic. Auxetic structures with newly designed lattices have been extensively studied with promising mechanical properties recently. Superior properties of auxetic structures are divided into two different groups: primary and secondary. Auxetic structures' primary properties are the negative Poisson's ratio value, synclastic behaviour, and variable permeability. Moreover, their secondary properties are improved by energy absorption,

resistance to impact, shear resistance, indentation resistance, and fracture resistance.

Auxetic structures can have various lattices and unit geometries. Production of auxetic structures can be achieved by cutting machines, additive manufacturing, folding methods, and combination of these methods. Auxetic structures can be adapted to be used in many different applications such as in the aerospace and defense industries, automotive and construction industries, biomedical, sensor, and textile industries to overcome the limitations of traditional materials and structures. Auxetic structures have advantages and disadvantages according to their mechanical properties and manufacturing processes. Their advantages are high strength, lightweight, high shear modulus, high

indentation resistance, high synclastic behavior, good crack resistance, high strength-to-weight ratio, energy consumption, and changing properties by changing material or structure proportions. Moreover, their disadvantages are difficulty in manufacturing, complex structures to be used in real life applications [1].

In this study, there are studies in the literature on this subject, in which the mechanical properties of auxetic structures are examined theoretically and experimentally. [2-7]. Within the scope of this study, many kinds of production methods have been used among the studies examined, and theoretical and experimental studies in which the mechanical properties of the produced/modeled samples are tested are also included in the literature [8-14]. With the inference from the studies examined, theoretical and experimental studies in which the use of auxetic structures in the field of engineering are evaluated and tested are included in the literature [15-23].

In many studies, new manufacturing methods like additive manufacturing methods on newly designed Auxetic structure mechanical properties have been proposed. Yang et al. [24], Josewin et al. [25], Alomarah et al. [26], Gülcan and Günaydın [27], Gürkan and Sağbas [28], and Joseph et al. [29] examined the mechanical properties of newly designed and known Auxetic structures produced by additive manufacturing. Plastic deformation and strength, impact and ballistic properties, fatigue properties, tensile properties, better shock absorption performance were examined and it was observed that mechanical properties are better in newly designed auxetic structures compared to traditional lattice structures. In addition, they differ from traditional structures with their Poisson's ratio approaching -1 and dimensional improvements.

Ranjbar et al. [30], [31], and [32] made a study about the vibroacoustic performance of the Auxetic structures. They reached a conclusion that auxetic structures can affect the acoustic properties of the areas. Teng et al. [33], Zhen et al. [34], Zhang et al. [35] Yuan et al. [36], Zhang [37], Hang [38], Prasad [39] studied the energy absorption properties of auxetic structures. Zhou [40], Ruxu [41], and Mercer et al. [50] examined the newly designed 3D-printed auxetic structures' impact behavior and ballistic behavior properties.

In studies by Hana et al. [42], Kalubadanage [43], and Seetoh [44] applications of newly designed auxetic structures especially lightweight applications and properties were examined. Some structures like tubular structures, rotation structures, cubic, bioinspired structures, and composite structures were examined by using auxetic structure methodology [45-49]. New studies with auxetic about machine learning on designs of dragonfly wings, structure wings, and produced systems were examined by Ranjbar et al. [51-52].

Erdoğan and Toktaş [53] theoretically studied about effects of unit geometry of newly designed auxetic structure lattice thickness on Negative Poisson's Ratio (NPR) and mechanical properties using Finite Element Analysis (FEA). They found that the negative Poisson ratio of the newly designed unit geometry was lower than some auxetic structures found in the literature and had superior mechanical properties.

After evaluating all the previous studies, this study was carried out in order to add a new unit cell to the literature and to create a structure with superior mechanical properties from similar unit cells in the literature. In this study, the newly designed auxetic lattice structures with 10 different geometries' inner thicknesses mechanical properties were examined by using finite element analysis (FEA).

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. A Unit Geometry Design and Modelling

(Birim Geometri Tasarımı ve Modellenmesi)

In this study, a unit geometry was designed newly by using Islamic geometric patterns methodology with the polygonal technique [54]. This design logic was used to create an auxetic unit cell different than the unit cells present in literature. This newly designed unit geometry is within the structural and geometric boundaries that are not present in literature. Newly designed unit geometry was used for the structure module by taking its mirror image by using SOLIDWORKS 2021 in 2D and 3D for analysis are given in Figure 1.

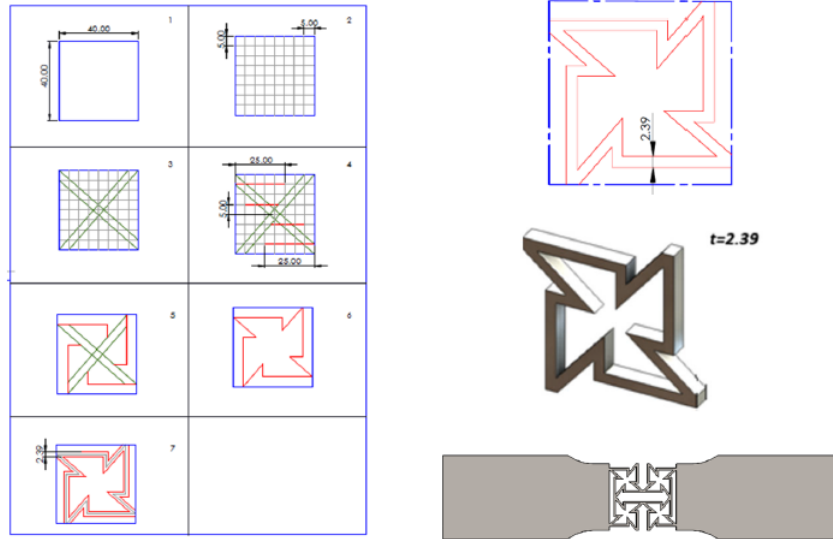


Figure 1. Design stages of the unit geometry (Birim geometrisinin tasarım aşamaları)

2.2. Analysis Structure Modelling of New Designed Auxetic Geometry (Yeni Tasarlanan Auxetic Geometrinin Analiz Yapısı Modellemesi)

In this study, newly designed unit geometry was examined in two different cases. The first case is unit geometry orientation; the second case is geometry inner thickness. ASTM, Tension Testing of Metallic Materials, Designation: E8/E8M-16a [55] was used for the production of analysis structure modeling. The analysis specimen template and dimensions are given in Figure 2.

Mechanical properties of the newly designed auxetic structure were analyzed in view of the lattices inner thicknesses. In this study, different lattices their models are given in Table 1. In order to observe the effects of structure thickness which are 2.39, 2.89, 3.39, 3.89, 4.39, 4.49, 4.59, 4.69, 4.79, and 4.89 mm on mechanical properties especially Poisson’s ratio, stiffness, and stiffness/mass ratio of new designed auxetic structure were determined. There are 10 different specimens modeled by changing the geometry inner thickness in increments of 0.250 mm up to a thickness of 4.39 mm, after this thickness in increments of 0.100 mm *t* Inner lattice structure thickness was created as 4.89 mm at most. The thickness increases to be made after this thickness has not been examined since they will disrupt the structure of the geometry. On the other hand, the reason why the inner lattice structure thickness value is not less than 2.39 mm was not examined because of the newly designed unit geometry default thickness.

In the preliminary study, different values were observed when the 2×1 and 2×3 matrix structures

were analyzed because they were not in the proper orientation to the geometry. Especially when the analysis in which the 2×1 matrix structure is examined, the structure exhibited anisotropic behavior. It has been observed that the 2×3 matrix structure has anisotropic properties too. In this study, 4×2, and 4×4, matrix structures were examined in terms of the application area and material structure properties, and the results were interpreted.

2.3. Analysis of Mechanical Properties (Mekanik Özelliklerin Analizi)

In this study, newly designed unit auxetic structures were investigated by using explicit dynamics analysis in ANSYS to demonstrate the effects of geometry inner thickness on the mechanical behavior of structures.

2.3.1. Poisson’s Ratio (Poisson’s Oranı)

The Poisson’s ratio is a ratio of lateral compression strain and longitudinal extension strain on one axis stress with a negative sign. The Poisson’s ratio formulation is given in Eq. 3.

$$\epsilon_{lateral} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \tag{1}$$

$$\epsilon_{axial} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \tag{2}$$

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}} \tag{3}$$

L_0 is the original length of the specimen, L_f is the final length of the specimen. ν is the Poisson’s ratio being unitless.

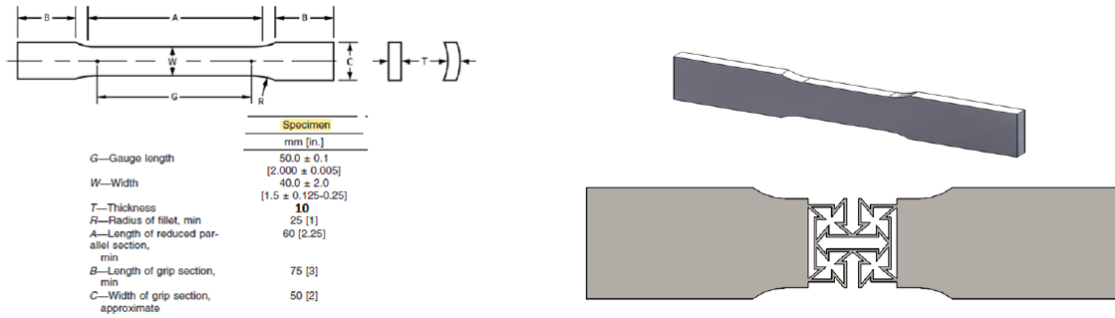

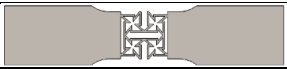
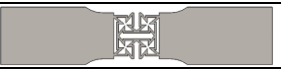
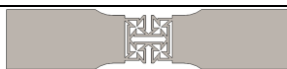
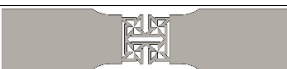
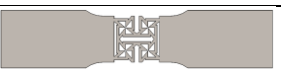
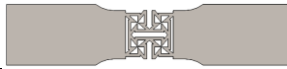


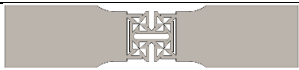


Figure 2. Analyzed specimen dimensions, template, and sample (Analiz edilen numune boyutları, şablon ve örnek)

Table 1. General properties of examined specimens (İncelenen numunelerin genel özellikleri)

Specimen No	1	2	3
Model			
Specimen thickness [mm]	2.39	2.89	3.39
Specimen mass [kg]	0.789	0.795	0.802
Specimen volume [mm ³]	100214.61	101059.73	101889.02
Specimen No	4	5	6
Model			
Specimen thickness [mm]	3.89	4.39	4.49
Specimen mass [kg]	0.808	0.815	0.815.
Specimen volume [mm ³]	102702.47	103500.10	103657.72
Specimen No	7	8	9
Model			
Specimen thickness [mm]	4.59	4.69	4.79
Specimen mass [kg]	0.817	0.818	0.819
Specimen volume [mm ³]	103814.72	103971.08	104126.8
Specimen No	10		
Model			
Specimen thickness [mm]	4.89		
Specimen mass [kg]	0.821		
Specimen volume [mm ³]	104297.37		

2.3.2. Analysis of Stiffness and Stiffness/Mass (Rijitlik ve Rijitlik/Kütle Analizi)

Stiffness/rigidity is defined as the property of maintaining its current state against a force. The stiffness value is calculated with Eq. 4:

$$S_x = \frac{F}{\delta} \quad (4)$$

F: is the force on the X-axis.

δ : is the displacement produced by the force along the same direction as a force on the X-axis.

S_x : is the stiffness on X-axis.

In addition, the stiffness/mass value is calculated using the Eq. 5:

$$S_{xm} = \frac{S_x}{m} \quad (5)$$

S_{xm} : is the stiffness/mass ratio on the X-axis.

m: mass of the structure.

In this study, stiffness, and stiffness/mass ratio were calculated using Eq. 4 and 5 in the X-axis direction since the pressure was applied along with the X force in the analysis operating setup.

2.4. Finite Element Analysis (Fea) and Boundary Conditions (Sonlu Eleman Analizi (FEA) ve Sınır Koşulları)

All models were analyzed by using ANSYS 2020 R1 for FEA. Although structural steel is frequently used in the construction sector, it is preferred in many structural parts in the automotive industry and aviation sectors due to its mechanical properties. Structural steel is used in many fields. Steel was preferred in structural analysis by taking this usage area and studies as a reference. Structural steel was selected as a material for all analyses because it negates the effect of the material parameter. Properties of the material are given in Table 3 taken from ANSYS engineering data [56].

All element size dimensions used while creating the mesh structure were determined as 2 mm for good mesh convergence. The average number of nodes is 73844 and the elements are 15500. Hex dominant method, Quad/Tri is free face mesh type was used for good meshing results. The average aspect ratio, average skewness value and Jacobian ratio are 1.103, 0.016, and 1.003, respectively. Increasing node number and element number provide good accuracy in results. Increasing the number of nodes and the number of elements increases the accuracy of the results. In this study, the error in the results was accepted as less than 1%, and mesh selection was made.

2.4.1. Static Structural Analysis Boundary Conditions and Tools (Statik Yapısal Analiz Sınır Koşulları ve Araçları)

Static structural parameters were designed to provide an analysis. Flag Red, A is denoted by pressure contact area or surface, direction, and magnitude. (Pressure is -0.2 MPa (100 N), Direction is parallel to the X-axis, Tension) and Flag Blue, B is denoted Fixed support contact area shown in Figure 3.

Poisson's ratio of lattice structures needs to be in directional deformation that is on the X-axis and Y-axis is necessary. For this reason, lateral in X-axis, and longitudinal in Y-axis directional deformations were found using the software.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In this study, the newly designed lattice structure's mechanical performance was examined by using FEA. During FEA, examined structures were subjected to tensile test with the same load in all structures. The Poisson's ratio, stiffness, and stiffness/mass ratio values were examined.

While calculating the Poisson's ratio of the first lattice structure, the directional deformation tool in the software was used. With this tool, the deformation values of the X and Y axis were compared. The pressure acting on the analysis model in all structures and free-body diagrams, completely is the same. Calculated Poisson's ratio values were performed by examining the effects of inner lattice structure thickness.

Relations between inner lattice thickness and Poisson's ratio given in Figure 4 and Figure 5 show the effects of inner lattice thickness on lattice Poisson's ratio, mass, volume and surface area of the studied new lattice auxetic structure.

As can be seen in Figure 4, the variation of the Poisson's ratio of the examined auxetic structure with the geometry inner thickness is given. It is seen that the Poisson's ratio approaches the value of -1 with the increase of the geometry inner thickness.

The mass, volume and surface area values of the examined auxetic lattice structure are given in Figure 5. As can be seen in Figure 5, as the thickness, volume and surface area of the examined auxetic structure increase, it is seen that Poisson's ratio approaches -1.

As can be seen from Figure 5, the increase in auxetic structure mass was found to be 1% on average at each step. When evaluated in terms of the volume of the structure, it was seen that it was the largest volume at the lowest Poisson's ratio, with an increase of approximately 1% at each step. In addition, the structure surface area increased as the geometry inner thickness increased due to the unit geometry. The highest surface area was seen in the structure with the lowest Poisson's ratio. In this

study, the increase in the values of the geometry inner thickness of the lattice structure, structure mass, volume and surface area brought the Poisson's ratio closer to -1. In this context, when evaluating according to usage area, mass, volume and surface area parameters must be evaluated together with Poisson's ratio.

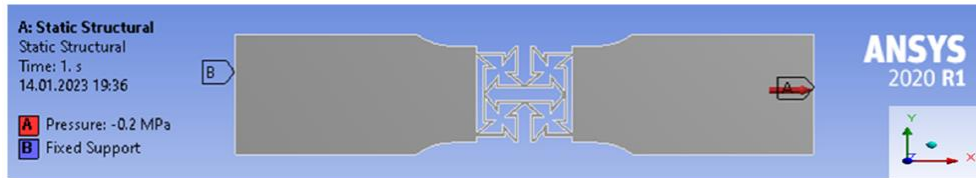


Figure 3. Boundary conditions and parameters (Sınır koşulları ve parametreler)

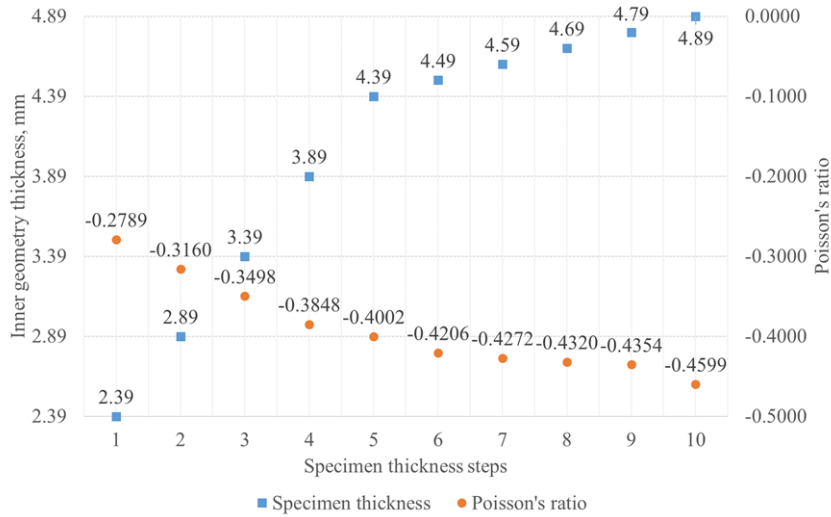


Figure 4. Results of Poisson's ratio of examined specimens with respect to inner geometry thickness (İncelenen numunelerin iç geometri kalınlığına göre Poisson oranının sonuçları)

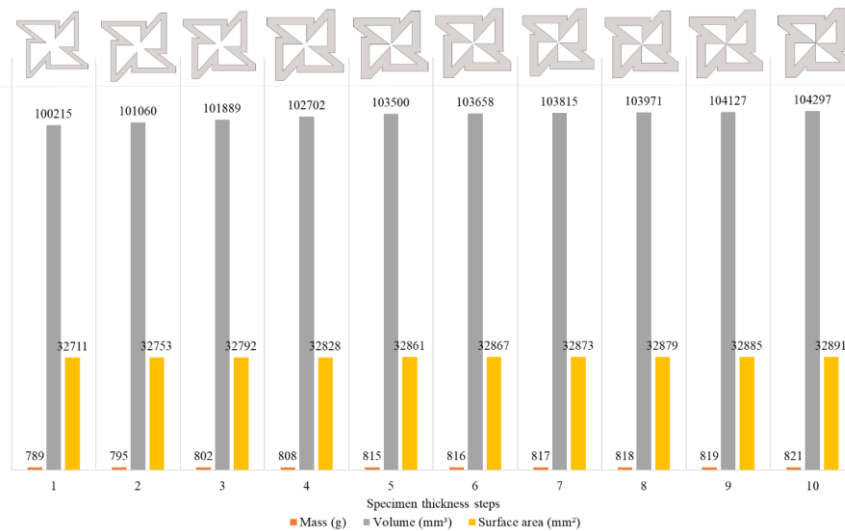


Figure 5. Examined specimens structure mass, volume and surface area (İncelenen numunelerin yapı kütlesi, hacmi ve yüzey alanı)

On the other hand, the stiffness and stiffness/mass ratio values of the analyzed structures were calculated using Eq.'s (4) and (5). In addition to Poisson's ratio analysis of examined lattice structure, the relation between inner lattice thickness and stiffness and stiffness mass ratio in this study are shown in Figure 6. When inner lattice thickness increases stiffness and stiffness/mass ratio values are increased, because that structure is more resistant to subjected forces.

For applications where mass, volume and surface area parameters are not priority, the lowest Poisson's ratio value was found to be -0.4599 in the auxetic structure with a geometry inner thickness of 4.89 mm determined in the 10th step. According to the mass, volume and surface area parameters, the selection of Poisson's ratio can be done easily from Figure 4. Stiffness and stiffness/ mass values were attached to see the effects of inner lattice thickness. Specimen 10 has high stiffness and stiffness/mass ratio than others. All examined specimens (newly

designed auxetic structures) have a negative Poisson's ratio. It was observed that with the increase of the geometry inner thickness, the structure mass, volume and surface area increased and the Poisson's ratio approached to -1.

The unit geometry studied in this study is a newly designed unit geometry that is not included in the literature. The Poisson's ratio obtained in this study was compared with the Poisson's ratio of the geometries examined in the studies given in the introduction. Figure 7 shows the comparison of Poisson's ratio values obtained from some studies in the introduction section and the results of this study. The unit geometry examined in this work comes to the fore when the aforementioned parameters are analyzed, despite the fact that a healthy comparison cannot be done because weight, volume, surface area, and stiffness values cannot be obtained.

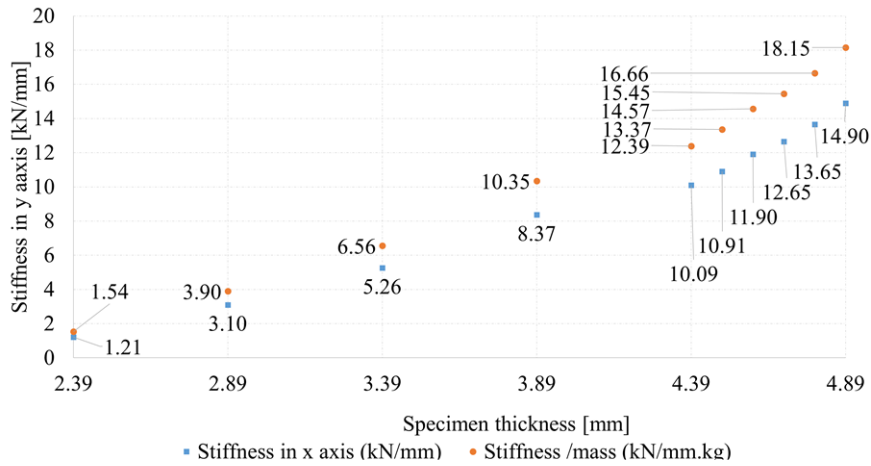


Figure 6. Results of stiffness and stiffness/mass ratio values of examined specimens with respect to inner geometry thickness (İncelenen numunelerin iç geometri kalınlığına göre sertlik ve sertlik/kütle oranı değerlerinin sonuçları)

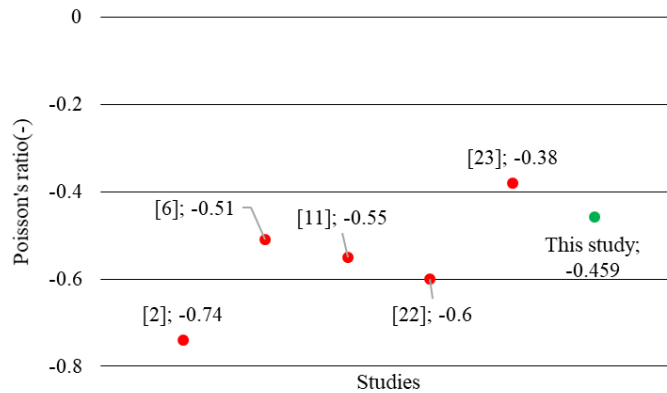


Figure 7. Comparison of the Poisson's ratio of the geometries in the literature with the Poisson's ratio obtained from this study (Literatürdeki geometrilerin Poisson oranının bu çalışmadan elde edilen Poisson oranı ile karşılaştırılması)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Within the scope of this study, unlike the auxetic structures in the literature, this unit geometry, which designed using the principles of Islamic geometric patterns and is unique in the literature, were studied. In this study, effects of different inner thickness changes on novel auxetic lattice structure' Poisson's ratio were performed. Study results showed that the auxetic structure with a geometry inner thickness of 4.89 mm computed in the 10th step has the lowest Poisson's ratio value of -0.4599. The newly designed and examined geometry in this study shows Negative Poisson's ratio feature as the geometries in the literature. The comparison of the Poisson's ratios of the newly designed auxetic structure with the auxetic structures in literature examined. Lattice structures are lighter than other full structures. They are suitable for lightweight applications.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

İsmail ERDOĞAN: He has done modeling, analysis processes and article writing processes.

Modellemeyi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

İhsan TOKTAŞ: He has contributed subject and article evaluation.

Konu ve makale değerlendirmesine katkıda bulunmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

NOMENCLATURE (KISALTMA)

2D	Two dimensional
3D	Three dimensional
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
δ	Displacement
ϵ	Strain

f	Final status
F	Force in X-axis
FEA	Finite element analysis
FEM	Finite element method
L	Length
L_f	Final length
L_o	Original length
m	Mass of the structure
NPR	Negative Poisson's ratio
o	Original status
PLA	Polylactic acid
S_x	Stiffness on X-axis.
S_{xm}	Stiffness/mass ratio on the X-axis.
xm	X axis stiffness/mass
t	Geometry inner thickness
x	X axis
ν	Poisson's ratio

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] A.V. Mazaev, O. Ajenez, M.V. Shitikova, Auxetics materials: classification, mechanical properties, and applications, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 747 (2020) 012008.
- [2] N. Novak, L. Biasetto, P. Rebesan, F. Zanini, S. Carmignato, L. Krstulovic-Opara, M. Vesenj, Z. Ren, Experimental and computational evaluation of tensile properties of additively manufactured hexa- and tetrachiral auxetic cellular structures, Additive Manufacturing 45 (2021) 102022.
- [3] S. Gohar, G. Hussain, M. Ilyas, A. Ali, Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses, Journal of Materials Research and Technology 15 (2021) 394–408.
- [4] K. Gunaydin, F.G. Gallina, A. Airol, G. Sala, A.M. Grande, Numerical and experimental crushing behaviour investigation of EBM printed auxetic chiral lattices, II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing - Sim-AM 2019 (2019).
- [5] I.K. Türkoğlu, H. Kasım, M. Yazıcı, Experimental investigation of 3D-printed auxetic core sandwich structures under quasi-static and dynamic compression and bending loads. International Journal of Protective Structures 14(1) (2023) 63-86.
- [6] S. Gök, Structural design and analysis of an impact resistant auxetic metamaterial. M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, (2021).
- [7] K. Meena, S. Singamneni, A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. Materials & Design 173 (2019) 107779.

- [8] C. Luo, C. Zhen, X. Zhang, G. Zhang, X. Ren, Design, manufacturing and applications of auxetic tubular structures: A review, *Thin-Walled Structures* 163 (2021) 107682.
- [9] M. Najafi, H. Ahmadi, L. Gholamhossein, Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures, *Materials Today: Proceedings* 34(1) (2020) 350–355.
- [10] Y. Shao, J. Meng, G. Mab, S. Ren, L. Fang, X. Cao, L. Liu, H. Li, W. Wua, D. Xiao, Insight into the negative Poisson's ratio effect of the gradient auxetic reentrant honeycombs, *Composite Structures* 274 (2021) 114366.
- [11] R. Nedoushan, Y. An, W. Yu, M. Abghary, Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness, *Composite Structures* 277 (2021) 114605.
- [12] S. Tabacu, N.D. Stanescu, A theoretical model for the estimate of the reaction force for 3D auxetic anti-tetra chiral tubular structures under tensile loads, *Thin-Walled Structures* 168 (2021) 108304.
- [13] J. Shena, K. Liua, O. Zenga, J. Gea, Z. Donga, Design and mechanical property studies of 3D reentrant lattice auxetic structure, *Aerospace Science and Technology* 118 (2021) 106998.
- [14] Y. Gao, X. Wei, X. Han, Z. Zhou, J. Xiong, Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism, *International Journal of Solids and Structures* 233 (2021) 111232.
- [15] S. Bronder, M. Adorna, T. Fila, P. Koudelka, J. Falta, O. Jiroušek, A. Jung, Hybrid auxetic structures: Structural optimization and mechanical characterization, *Advanced Engineering Materials* 23 (2021) 2001393.
- [16] A.R. Sangsefidi, S. H. Dibajian, J. Kadkhodapour, A. P. Anaraki, S. Schmauder, Y. Schneider, An Abaqus plugin for evaluation of the Auxetic structure performance, *Engineering with Computers* 38(2) (2022) 1681–1704.
- [17] W. Wu, P. Liu, Z. Kang, A novel mechanical metamaterial with simultaneous stretching- and compression-expanding property, *Materials & Design* 208 (2021) 109930.
- [18] G.Z. Fan, X. Ren, S.L. Wang, C. Luo, Y.M. Xie, A novel cement-based auxetic foam composite: Experimental study, *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022) e01159.
- [19] M. Wallbanks, M. F. Khan, M. Bodaghi, A. Triantaphyllou, A. Serjouei, On the design workflow of auxetic metamaterials for structural applications, *Smart Materials and Structures* 31 (2022) 023002.
- [20] U. Kemiklioglu, Novel design and comparison of structural and modal analyses of auxetic geometry versus honeycomb geometry, *Journal of Applied Mechanical Engineering* 10 (2) (2021) 1000349.
- [21] S. Wang, C. Deng, O. Ojo, B. Akinrinlola, J. Kozub, L. Wu, Design and modeling of a novel three-dimensional auxetic reentrant honeycomb structure for energy absorption, *Composite Structures* 280 (2022) 114882.
- [22] D. Photiou, S. Avraam, F. Sillani, F. Verga, O. Jay, L. Papadakis, Experimental and numerical analysis of 3D printed polymer tetra-petal auxetic structures under compression, *Appl. Sci.* 11(21) (2021) 10362.
- [23] G. Zhang, X. Ren, W. Jiang, X. Zhang, C. Luo, Y. Zhang, M. Xie, A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study, *Composite Structures* 282 (2022) 110956.
- [24] C. Yang, H.D. Vora, Y. Chang, Behavior of auxetic structures under compression and impact forces, *Smart Materials and Structures* 27 (2018) 025012.
- [25] J. Lawrensen, A. Nazir, C.P. Hsu, Comparison between 3D printed auxetic and non-auxetic structures: Simulation and experimental validation, *International Journal of Innovative Science and Research Technology* 6(9) (2021) 2456–2165.
- [26] A. Alomarah, S.H. Masood, I. Sbarski, B. Faisal, Z. Gao, D. Ruan, Compressive properties of 3D printed auxetic structures: experimental and numerical studies, *Virtual and Physical Prototyping* 15(1) (2020) 1–21.
- [27] O. Gülcan, K. Günaydın, Distortion and dimensional deviation of Inconel 718 auxetic structures produced by DMLM, *Journal of Additive Manufacturing Technologies* 1(3) (2021) 563.
- [28] D. Gürkan, B. Sağbaş, Additively manufactured Ti6Al4V lattice Structures for biomedical applications, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.* 5(2) (2021) 155–163.
- [29] A. Joseph, V. Mahesh, D. Harursampath, On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: A review, *Adv. Manuf.* 9 (2021) 342–368.
- [30] A. Hosseinkhani, D. Younesian, M. Ranjbar, F. Scarpa, Enhancement of the vibro-acoustic performance of anti-tetra-chiral auxetic sandwich panels using topologically optimized local resonators, *Applied Acoustics* 177 (2021) 107930.
- [31] M.S. Mazloomi, M. Ranjbar, L. Boldrin, F. Scarpa, S. Patsias, N. Ozada, Vibroacoustics of 2D gradient auxetic hexagonal honeycomb sandwich panels, *Composite Structures* 187 (2018) 593–603.
- [32] M.S. Mazloomi, M. Ranjbar, Hybrid design optimization of sandwich panels with gradient shape anti-tetrachiral auxetic core for vibroacoustic applications, *Transport in Porous Media* 142 (2022) 5–22.

- [33] X. C. Teng, X. Ren, Y. Zhang, W. Jiang, Y. Pan, X.G. Zhang, X.Y. Zhang, Y.M. Xie, A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption, *International Journal of Mechanical Sciences* 229 (2022) 107524.
- [34] T. Wang, Z. Li, L. Wang, X. Zhang, Z. Ma, In-plane elasticity of a novel arcwall-based double-arrowed auxetic honeycomb design: Energy-based theoretical analysis and simulation, *Aerospace Science and Technology* 127 (2022) 107715.
- [35] W.M. Zhang, Z.Y. Li, J.S. Yang, L. Ma, Z. Lin, R. Schmidt, K.U. Schröder, A lightweight rotationally arranged auxetic structure with excellent energy absorption performance, *Mechanics of Materials* 166 (2022) 104244.
- [36] T. Wang, Y. Xie, L. Wang, X. Zhang, Z. Ma, Size effects of elastic properties for auxetic cellular structures: bending energy-based method, *Materials Today Communications* 31 (2022) 103585.
- [37] Y. Zhang, X. Ren, D. Han, X. Cheng, W. Jiang, X.G. Zhang, X.Y. Zhang, Y.M. Xie, Static and dynamic properties of a perforated metallic auxetic metamaterial with tunable stiffness and energy absorption, *International Journal of Impact Engineering* 164 (2022) 104193.
- [38] M.F. Guo, H. Yang, L. Ma, 3D lightweight double arrow-head plate-lattice auxetic structures with enhanced stiffness and energy absorption performance, *Composite Structures* 290 (2022) 115484.
- [39] R.P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, T. Ngo, Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimisation, *International Journal of Mechanical Sciences* 211 (2021) 106793.
- [40] Y. Zhou, Y. Li, D. Jiang, Y. Chen, Y.M. Xie, L.J. Jia, In-plane impact behavior of 3D-printed auxetic stainless honeycombs, *Engineering Structures* 266 (2022) 114656.
- [41] W. Yang, R. Huang, J. Liu, J. Liu, W. Huang, Ballistic impact responses and failure mechanism of composite double-arrow auxetic structure, *Thin-Walled Structures* 174 (2022) 109087.
- [42] D. Han, X. Ren, Y. Zhang, X.Y. Zhang, X.G. Zhang, C. Luo, Y.M. Xie, Lightweight auxetic metamaterials: Design and characteristic study, *Composite Structures* 293 (2022) 115706.
- [43] D. Kalubadanage, A. Remennikov, T. Ngo, C. Qi, Experimental study on damage magnification effect of lightweight auxetic honeycomb protective panels under close-in blast loads, *Thin-Walled Structures* 178 (2022) 109509.
- [44] I.P. Seetoh, B. Leong, E.L. Yi, K. Markandan, P. K. Kanaujia, C.Q. Lai, Extremely stiff and lightweight auxetic metamaterial designs enabled by asymmetric strut cross-sections, *Extreme Mechanics Letters* 52 (2022) 101677.
- [45] A. Sorrentino, D. Castagnetti, L. Mizzi, A. Spaggiari, Bio-inspired auxetic mechanical metamaterials evolved from rotating squares unit, *Mechanics of Materials* 173 (2022) 104421.
- [46] J. Li, Z.Y. Zhang, H.T. Liu, Y.B. Wang, Design and characterization of novel bi-directional auxetic cubic and cylindrical metamaterials, *Composite Structures* 299 (2022) 116015.
- [47] Z.Y. Li, X.T. Wang, L. Ma, L.Z. Wu, Study on the mechanical properties of CFRP composite auxetic structures consist of corrugated sheets and tubes, *Composite Structures* 292 (2022) 115655.
- [48] C. Luo, X. Ren, D. Han, X.G. Zhang, R. Zhong, X.Y. Zhang, Y.M. Xie, A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: Design and compressive characteristic study, *Engineering Structures* 268 (2022) 114759.
- [49] W. Jiang, X. Ren, S.L. Wang, X.G. Zhang, X.Y. Zhang, C. Luo, Y.M. Xie, F. Scarpa, A. Alderson, K.E. Evans, Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: A state-of-the-art review, *Composites Part B: Engineering* 235 (2022) 109733.
- [50] C. Mercer, T. Speck, J. Lee, D.S. Balint, M. Thielen, Effects of geometry and boundary constraint on the stiffness and negative Poisson's ratio behaviour of auxetic metamaterials under quasi-static and impact loading, *International Journal of Impact Engineering* 169 (2022) 104315.
- [51] I. Zhilyaev, D. Krushinsky, M. Ranjbar, A. O. Krushynska, Hybrid machine-learning and finite-element design for flexible metamaterial wings, *Materials & Design* 218 (2022) 110709.
- [52] I. Zhilyaev, N. Anerao, A.G.P. Kottapalli, M.C. Yilmaz, M. Murat, M. Ranjbar, A. Krushynska, Fully-printed metamaterial-type flexible wings with controllable flight characteristics, *Bioinspir. Biomim.* 17 (2022) 025002.
- [53] İ. Erdoğan, İ. Toktaş, Investigation of the effect of geometry inner thickness on new designed auxetic structure, *Journal of Polytechnic*, early view.
- [54] R. Penrose, *Islamic Geometric Patterns*, Nature 2017 USA.
- [55] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Designation: E8/E8M – 16a. 2016.
- [56] Ansys Analysis Software, Material Library, ANSYS 2020 R1.

Neutronic Assessment of High-Temperature Gas-Cooled Thorium Burner using Monte Carlo Calculation Method with Full Core Model

Ahmet ÇİFCİ^{*1}  Adem ACIR² 

^{*1} Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500, Yenimahalle-Ankara/TURKEY

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500, Yenimahalle-Ankara/TURKEY

Article Info:

Research article
Received: 24/05/2023
Revision: 03/06/2023
Accepted: 04/06/2023

Keywords

Monte Carlo
HTGR
Reactivity
Burnup analysis
Graphite

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/05/2023
Düzeltilme: 03/06/2023
Kabul: 04/06/2023

Anahtar Kelimeler

Monte Carlo
HTGR
Reaktivite
Yanma Analizi
Grafit

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

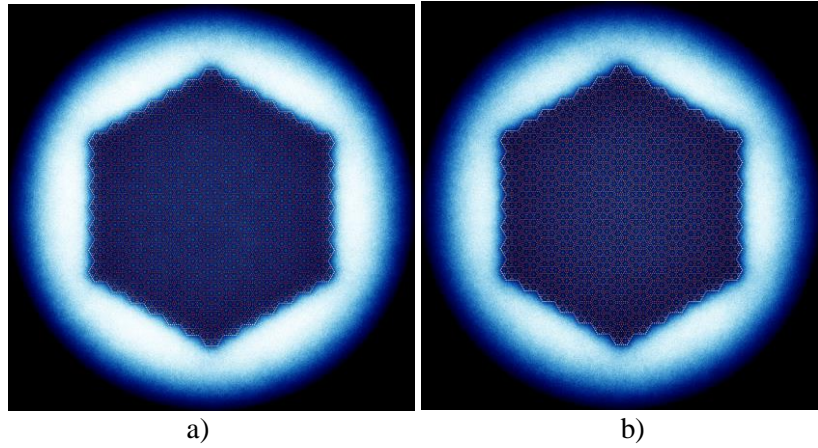


Figure A: a) burning at the beginning / HTGR tam çekirdeğinde başlangıçta yanma, b) burning at the end of life of HTGR full core / işletim zamanı sonu yanma

Highlights (Önemli noktalar)

- 3D heterogeneous reactor analysis / 3D heterojen reaktör analizi
- SiC cladding effect on reactivity / SiC kaplamanın reaktivite üzerindeki etkisi

Aim (Amaç): To examine the effect of SiC and ZrC compounds on the reactivity differences between 3D heterogeneous reactor analysis and semi-homogeneous reactor analysis. / SiC ve ZrC bileşiklerinin 3D heterojen reaktör analizi ve yarı homojen reaktör analizi arasındaki reaktivite farklılıkları üzerindeki etkisini incelemek.

Originality (Özgünlük): 3D heterogeneous reactor analysis, Analyze with SiC cladding. / 3D heterojen reaktör analizi, SiC kaplama ile analizi

Results (Bulgular): The burnup value has been computed as 189 GWd/ton and it was observed that the reactor operation time is up to 4500 days when the high-quality graphite used as a moderator. / Yakma değeri 189 GWd/ton olarak hesaplanmış ve moderatör olarak kaliteli grafit kullanıldığında reaktör çalışma süresinin 4500 güne kadar çıktığı gözlemlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): SiC, which has smaller neutron absorption cross sections has a positive effect on reactivity compared to ZrC. / Daha küçük nötron absorpsiyon kesitlerine sahip olan SiC, ZrC'ye kıyasla reaktivite üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.



Neutronic Assessment of High-Temperature Gas-Cooled Thorium Burner using Monte Carlo Calculation Method with Full Core Model

Ahmet ÇİFCİ^{*1} Adem ACIR²

^{*1} Gazi University, Institute of Graduate Studies in Science, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle-Ankara/TURKEY

² Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle-Ankara/TURKEY

Article Info

Research article
Received: 24/05/2023
Revision: 03/06/2023
Accepted: 04/06/2023

Keywords

Monte Carlo
HTGR
Reactivity
Burnup analysis
Graphite

Abstract

In this study, the effective reactivity and burnup analyses have been performed for heterogeneous three-dimensional high-temperature gas-cooled thorium reactor (HTGR) which has 60 MWth full core geometry by using continuous-energy multi-purpose three-dimensional Monte Carlo particle transport Serpent code with ENDF/ B-VII data libraries. Nuclear fuel has been selected as 50 % ThO₂+50% RG-PuO₂. Firstly, effective reactivity for three different qualities of graphite for operation period have been determined. The effective reactivity showed better performance with increasing densities of graphite. Secondly, it has been also examined to ZrC and SiC cladding materials effect on the effective reactivity. It is observed that SiC has a positive effect on reactivity compared to ZrC. As a results, the full core life low-power thorium-burner HTGR have been calculated as up to ~4500 days depending on the graphite material whereas, the corresponding burnups came out to be ~ 189 GWd/ton, for end of life.

Monte Carlo Hesaplama Yöntemi Kullanılarak Yüksek Sıcaklıkta Gaz Soğutmalı Toryum Yakıcının Tüm Çekirdek Modeli ile Nötronik Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/05/2023
Düzeltilme: 03/06/2023
Kabul: 04/06/2023

Anahtar Kelimeler

Monte Carlo
HTGR
Reaktivite
Yanma Analizi
Grafit

Öz

Bu çalışmada, ENDF/ B-VII veri kütüphaneleriyle sürekli enerji çok amaçlı üç boyutlu Monte Carlo parçacık taşınım kodu SERPENT kullanılarak 60 MWth güce sahip reaktörün, tüm çekirdek geometriyle heterojen üç boyutlu yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı toryum reaktörü (HTGR) için etkin reaktivite ve yanma analizleri yapılmıştır. Nükleer yakıt %50 ThO₂+%50 RG-PuO₂ olarak seçilmiştir. İlk olarak, üç farklı kalitede grafit için işletme süresi boyunca etkin reaktivite belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Etkin reaktivitenin, artan grafit yoğunluklarıyla daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. İkinci olarak ZrC ve SiC kaplama malzemelerinin etkin reaktivite üzerindeki etkisi incelenmiştir. SiC'nin ZrC'ye kıyasla reaktivite üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, düşük güçlü toryum yakıcı HTGR'nin tam çekirdek ömrü grafit malzemeye bağlı olarak ~4500 gün olarak hesaplanmış, son güne karşılık gelen yanma ise ~ 189 GWd/ton olarak çıkmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Nuclear wastes have been generated during the nuclear electricity generation of different countries for the last 50 years using nuclear energy, and the vast majority of these wastes are civilian plutonium stocks. Currently, reactor grade plutonium is estimated at around 1700 tonnes. Since there is a serious concern in the world about the misuse and radiotoxic release of this plutonium, which is obtained as nuclear waste, it is of interest to evaluate and reduce the plutonium stocks as nuclear fuel. For the management of plutonium, incineration is one of

the alternative methods. However, if plutonium nuclear waste is used in the form of uranium/plutonium mixed oxide (MOX), second generation plutonium will be produced. Another alternative method is to burn plutonium with thorium fuel. Since thorium cannot be a used alone, plutonium must be used as fissile fuel material for the thorium fueled reactor [1]. Previous work has investigated the incineration of plutonium in CANDU reactors [2-4], Fixed bed nuclear reactor (FBNR) [5], high temperature pebble bed nuclear reactors (PBMR)[6] and high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) [7-9] in combination with

thorium extensively in detail. There is a large-scale study for III+ generation nuclear reactor around the world in the literature. One of these reactors is high temperature gas cooled nuclear reactor (HTGR). HTGR types of reactors could consider transition of VHTGR. In recent years, developments on low-power, high-temperature gas-cooled reactors (HTGR) have been a source of light in the development of nuclear energy. Low-capacity modular HTGRs is studied in the United States, Russia, Germany, France and Japan, which have well-developed nuclear energy programs, and further studies on the development of HTGR continue in Korea, China, South Africa and India [9-13]. HTGR type reactors which has different pellet sizes and fuel assemblies have been usually analysed by the reactor core cell method by I.V. Shamanin [8] by using neutronic computer codes of the MCU-5 series. Also, HTGR used in the calculations is based on a 78-channel fuel assembly by using neutronic computer codes of the MCU-5 series [9]. TRISO particle which has outer layer Ti_3SiC_2 clad as fuel inside fuel pellet which has SiC clad, was used in the geometry. SiC is a newer cladding material than ZrC in literature. In some studies, ZrC was used as a cladding material. In another study, ZrC and SiC materials were compared [14]. In addition, with the development of technology because of engineering studies, there has been a significant increase in thermal efficiency. The efficiency of gas turbines in HTGR is up to 50 percent as pointed by H. C. No. [15].

Looking at recent studies, research and development studies in reactors are mostly carried out in small modular reactors (SMR). According to the classification adopted by the International Atomic Energy Agency (IAEA); Small Reactors are reactors with installed electricity generation power of less than 300 MWe, Medium Reactors are reactors with installed electricity generation power between 300 and 700 MWe. The Small Modular Reactors class includes Integrated Pressure Water Reactors, Molten Salt Reactors, High Temperature Gas Cooled Reactors, Liquid Metal Cooled Reactors, and Solid State or Heat Pipe Reactors. SMRs contain innovative features in some of their designs. In some designs, coolant systems can use natural convection to eliminate pumps. Accordingly, Loss of Coolant Accidents (LOCA) are prevented [18]. They have negative temperature coefficients in the moderator and fuel. This situation keeps the fission reactions under control and causes the reaction to slow down when the temperature increases [19]. SMRs stand out because they are safe, cost effective and can produce clean energy. Small Modular Reactors stand out compared to

Light Water Reactors due to their low investment costs and small size. These reactors are generally designed to serve military garrisons, desalinate, power generation, produce high-quality heat, deliver energy to places where the grid connection cannot reach, and be used in other industrial services. SMR designs may use light water or other refrigerants such as gas, liquid metal, or molten salt as the coolant. In addition to being portable, it also provides great advantages that they have fast installation.

Looking at recent studies of HTGRs, HOLOS reactor comes to the fore. HOLOS is a HTGR type reactor designed in accordance with the micro-reactor concept. HOLOS consists of four subcritical power modules. These modules combine to make the reactor critical. It can produce 22 MW of thermal energy. In the core, there are 151 hexagonal fuel assembly. Each of these assembly contains 19 fuel channels and 54 cooling Helium gas channels. Zirconium element is used as the envelope material on the outer part of the cooling channels. Similarly, to prevent the direct interaction of the reflective part of the reactor with the air, a layer of Zirconium was placed on the outer part of the reflector made of Beryllium. More information on the HOLOS reactor can be found in Stauff's study [20].

Finally, if we summarize HTGRs, Graphite is used as a moderator and Helium is used as a coolant in HTGRs. The main reason for using Helium as a coolant is that Helium is an inert gas and accordingly it does not react chemically with any substance. Also, Helium does not become radioactive when exposed to neutrons.

In this paper, unlike in the literature, the effect of the SiC and ZrC cladding materials on criticality in the HTGR have been performed of the heterogeneous 3D full core geometry. Neutronic calculations have been performed the Serpent code [16] which has a continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code with ENDF/ B-VII cross section, decay and fission libraries. In addition, the effects of the quality of the graphite used on the effective reactivity and amount of burning thorium has been compared with literature.

2. Methods & Calculations (Metot & Hesaplamalar)

The vertical and horizontal view of the low power HTGR obtained by using Serpent Monte Carlo nuclear code has been given in Figs. 1 and 2. There are 127 assemblies in the reactor. Each assembly consists of 78 hexagonal fuel channels and 7 coolant

channels. Each fuel channel included 120 fuel pellets with SiC clad. Technical specifications of the simulated low power HTGR have been presented in the Table 1 [8-9]. In the calculations model which has 78-channels hexagonal assembly has been used. The hexagonal assembly has been shown in Fig.3. In this assembly, big bores are symbolized to helium

channel and its radius are equal to 1.2 cm. Small bores are symbolized to fuel channel and its radius are equal to 0.6 cm. Flat to flat dimension of hexagonal assembly is equal to 20 cm. All technical details can be found in the I.V. Shamanin's studies [8-9].

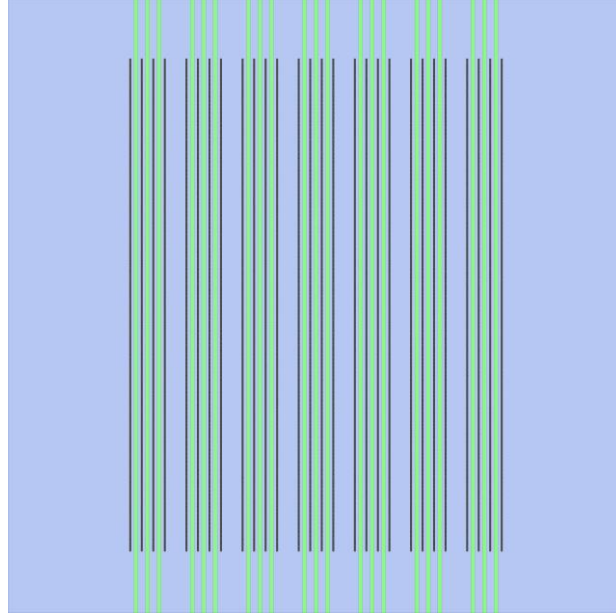


Fig. 1. Vertical Section of the HTGR full core model
(HTGR tam çekirdek modelinin dikey kesiti)

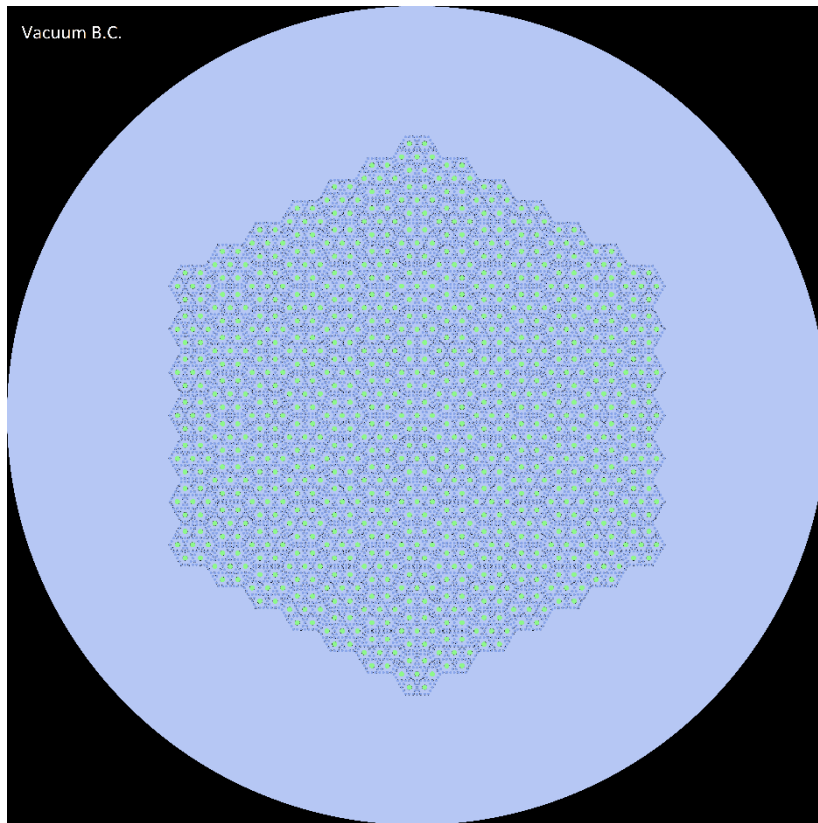


Fig. 2. Horizontal Section of the HTGR full core model
(HTGR tam çekirdek modelinin yatay kesiti)

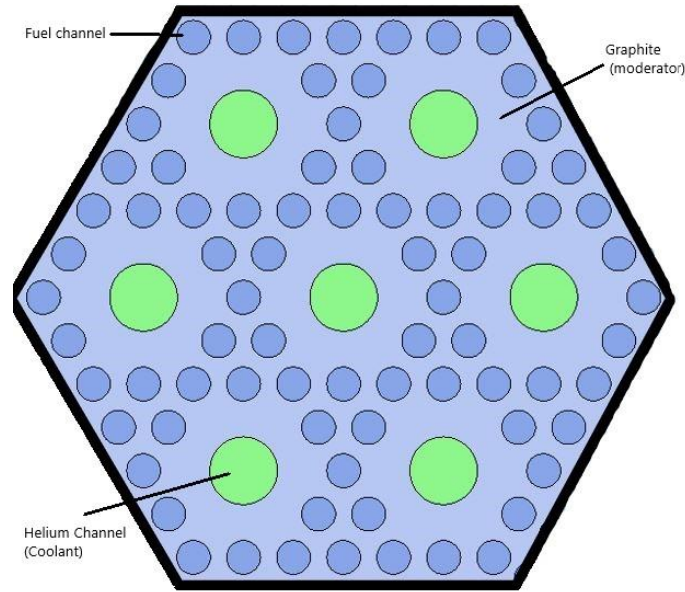


Fig. 3. Hexagonal bundle assembly view of the HTGR
(HTGR'nin Altıgen Yakıt Demeti Görünümü)

Table 1. Technical data of simulated core LPHTGR [8] (Simüle çekirdek LPHTGR'nin teknik verileri)

Specification	Value
Thermal power (MWth)	60
Efficiency factor (%)	up to 50
Height of core (m)	2.4
Height of core with reflector (m)	3.0
Core radius with reflector (m)	1.5011
Reflector thickness (m)	~0.20
Pellet diameter with clad (m)	0.0120
Pellet diameter (m)	0.0114
Height of pellet with clad (m)	0.020
Operating temperature (K)	1250

A pellet figure in which pebbles has been dispersed is given Fig. 4. The inside of the pellet consists of sintered graphite. The pebbles have been dispersed on the sintered graphite surface. The clad of the pellet is a thin SiC surface. In addition, ZrC has been used as a cladding material on its outer surface to examine its effect to reactivity.

The particles dispersed on the pellet have been given in Fig. 5. The materials used in the regions of

this sphere are fuel, pyrolytic carbon and Ti_3SiC_2 respectively, starting from the center. A mixture of heavy grade Pu and Th was used as fuel. Fuel region in the pebble image consists of $(Pu, Th)O_2$. The isotope amount of Pu and Th are taken from the study made by Shamanin.[9] study. The fuel has produced with a ratio of 50 % $ThO_2+50\% RG-PuO_2$. The density of the fuel is 10.4 g/cm^3 . The isotope ratio of Pu has been given in Table-2

Table 2. Isotopic concentration data of Pu [9]. (Pu'nun izotopik yüzdelik verileri)

Pu isotopic composition	^{238}Pu (%)	^{239}Pu (%)	^{240}Pu (%)	^{241}Pu (%)	^{242}Pu (%)
Fraction	1.8	59	23	12.2	4

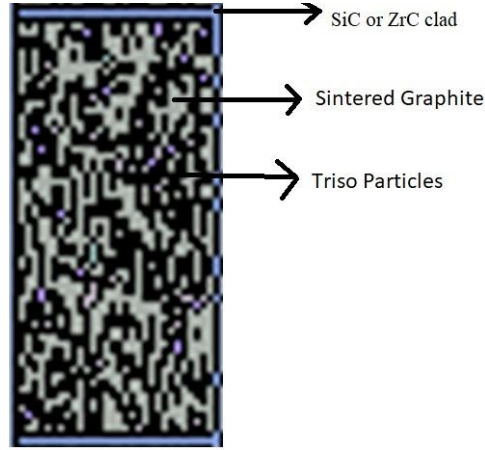


Fig. 4. Calculation fuel pellets model of fuel assembly
(Yakıt demetinde yakıt pelet modelinin hesaplanması)

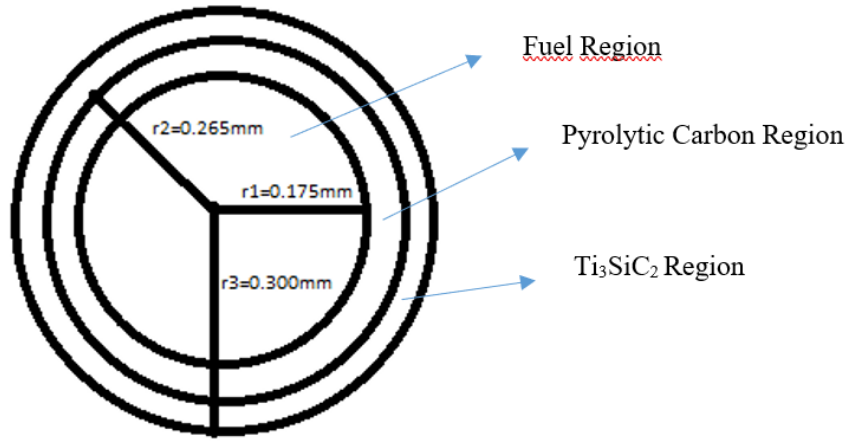


Fig. 5. TRISO particles of the fuel pellets model of fuel assembly
(Yakıt demetinde yakıt pelet modelinin TRISO parçacıkları)

In order to disperse the pebble on the pellet, Serpent disperse routine was used, so that no approximations used such as grow and shake algorithm. Three different qualities of graphite were used for the graphite blocks used in the reactor. These are 1.65 g/cm^3 , 1.80 g/cm^3 and 2.16 g/cm^3 respectively. The effect of the quality of graphite used on the amount of burned thorium and the operating time of the reactor has been examined. In this study, the density of graphite used as a moderator has been taken as 2.16 g/cm^3 , while making the main calculations, and SiC was preferred as the clad material. The neutronic calculations for heterogeneous 3D full core geometry, SERPENT Monte Carlo reactor physics burnup calculation code with ENDF/ B-VII cross section have been performed [16].

3. Results and Discussions (Sonuçlar ve Tartışma)

The neutronic calculations for a low power HTGR three dimensional heterogeneous full core were performed for various parameters, such as the density of the hexagonal graphite blocks and SiC and ZrC cladding materials in the fuel pellet. The Serpent continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code with ENDF/ B-VII data libraries have been used. During the course of calculations, the reactor power has been assumed as $60 \text{ MW}_{\text{th}}$.

In the study using the reactor core cell method [8], the initial infinite reactivity value was obtained then it was higher than the initial effective reactivity value of three dimensional heterogeneous full core method. Because reactor core cell method couldn't converge the neutron leakage exactly. When reactor

core cell method has been used, it is observed that reactivity is more about 5 percent.

The effective reactivity has been determined as $(k_{eff}-1)/k_{eff}$ over operation period in the 3D heterogeneous full core method [17]. As shown in Fig.6, the results of the effective reactivity for different density of the hexagonal graphite blocks have been presented. The effective reactivity with increasing density of graphite has been increased. It is seen that when the quality of the graphite in the moderator increases, the neutron leakage decreases, therefore the initial reactivity value is higher. The long operating time of the reactor has been provided

with increasing graphite density due to highest moderation. Also, SiC and ZrC cladding materials in fuel pellet are compared for the highest moderation situation as shown in Fig. 7. As illustrated in Fig 7., it is seen that Zr metal has a negative effect on reactivity. It has been observed that reactivity decreases by 2 to 3 percent when ZrC cladding is used in the reactor. This is because SiC has smaller neutron absorption cross sections than ZrC. There are also other advantages of using SiC compounds as clads. general chemical inertness, ability to withstand higher fuel burns and higher temperatures, exceptional inherent radiation resistance, etc [14].

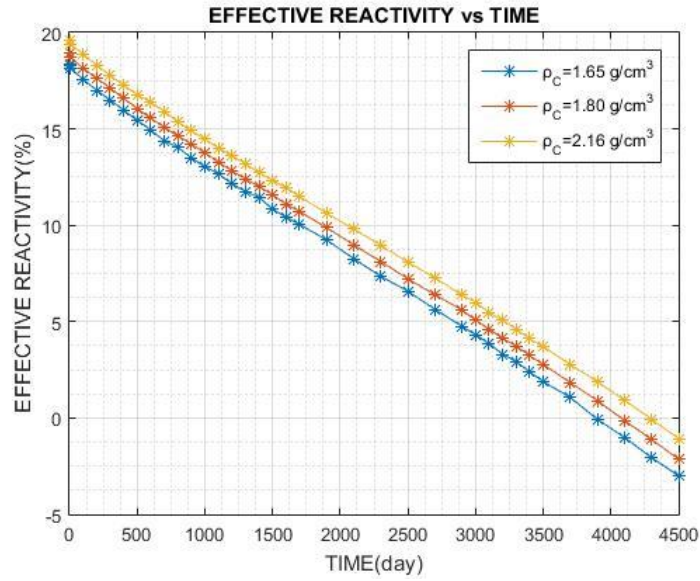


Fig. 6. Effective reactivity variations with different graphite density of HTGR full core (HTGR tam çekirdeğin farklı grafit yoğunluğu ile etkin reaktivite değişimleri)

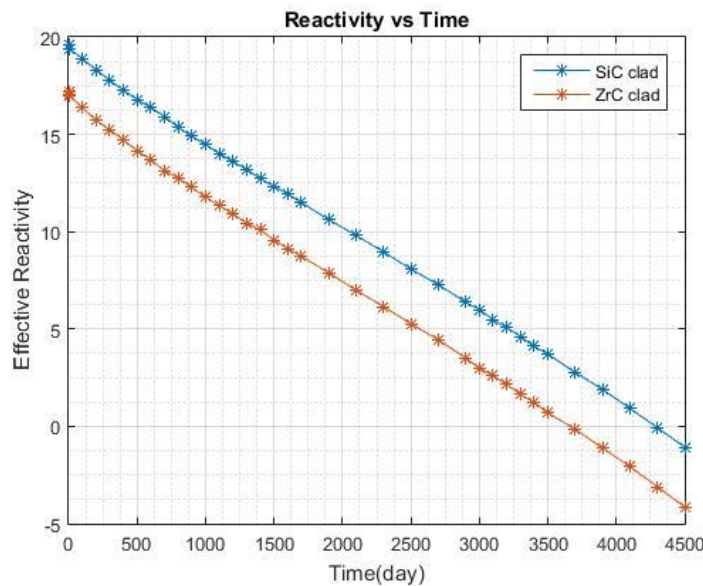


Fig. 7. Effective reactivity variations with different cladding material of HTGR full core (HTGR tam çekirdeğin farklı kaplama malzemeleriyle etkin reaktivite değişimleri)

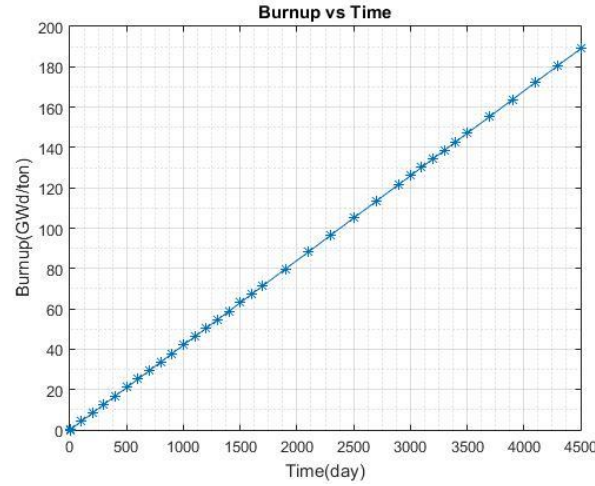


Fig. 8. Changes of the burnup values for 2.16 g/cm³ graphite density of HTGR full core (HTGR tam çekirdeğin 2,16 g/cm³ grafit yoğunluğu için yanma değerlerinin değişimi)

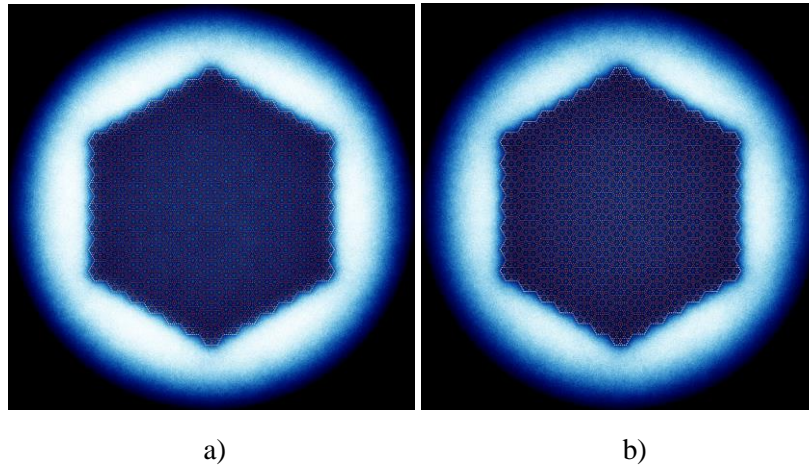


Fig. 9. The images a) burning at the beginning, b) burning at the end of life of HTGR full core (Görüntü a) HTGR tam çekirdeğinde başlangıçta yanma b) işletim zamanı sonu yanma)

The SiC compounds have been chosen for all these advantages viz., increasing criticality and operation time in the neutronic analysis. As shown in Fig. 8., the burnup values over operation times have been performed. The burnup values have been obtained as 147 GWd/ton at 3500 days. The obtained results with reactor core cell method performed by I.V. Shamanin [8-9] have been compared with three-dimensional heterogeneous full core in this study. The obtained results have been verified with I.V. Shamanin [8-9]. Neutronic analysis of low power HTGR was made with a 3D heterogeneous model, and it was observed that the reactor worked up to 4500 days when the density of graphite used as a moderator in the reactor was 2.16 g/cm³. Due to this, the burnup value when using higher quality graphite as a moderator is 189 GWd/ton end of life for using 3D heterogeneous full core calculations as shown in

Fig. 8. Also, the burning images of the reactor on initial and final days are given as shown in Fig. 9.

As shown in Fig. 10., it was also observed that when using high quality graphite, the reactor thermalized and burned less thorium. According to the data given in Table 3, when the graphite density is equal to 2.16 gr/cm³, 7.94 percent of the thorium in the fuel is burned. In addition, 6.9074x10³ g ²³³U is formed as a result of burning thorium as presented in Fig 10. Also, Plutonium isotopes changes have been given in Fig. 11. ²³⁹Pu isotope is decreasing with operation time, whereas the other isotopes of Pu are increasing. Approximately 3.78973x10⁵ g Pu ²³⁹ is consumed in the reactor. In addition, there is a significant increase in the masses of Pu-240 and Pu-241 isotopes.

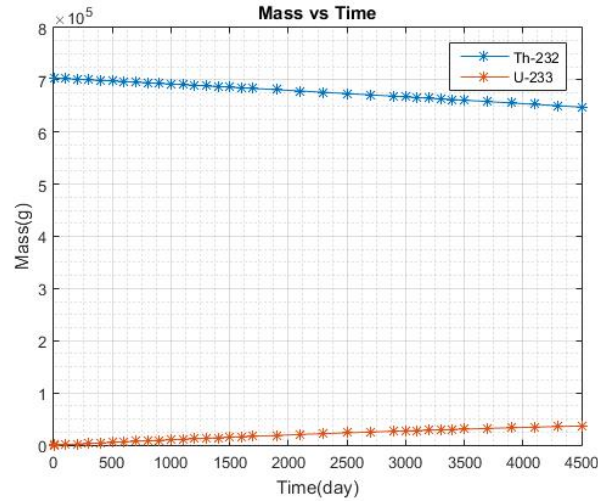


Fig. 10. Temporal variation of density (^{232}Th and ^{233}U) in the HTGR full core with SiC fuel pellet clad (SiC yakıt peleti kaplı HTGR tam çekirdeğinde geçici yoğunluk değişimi (^{232}Th ve ^{233}U))

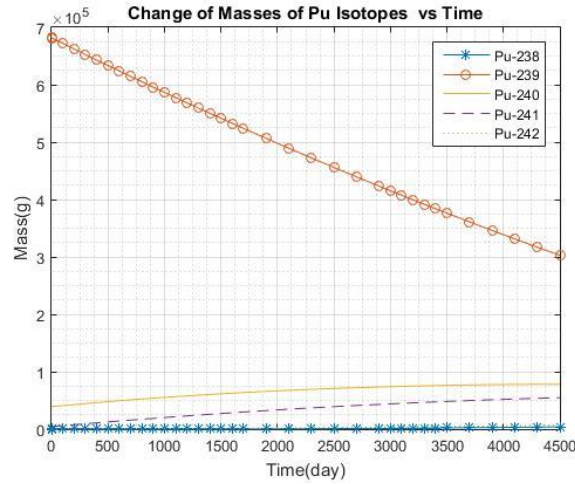


Fig. 11. Temporal variation of density (Pu isotopes) in the HTGR full core with SiC fuel pellet clad (SiC yakıt peleti kaplı HTGR tam çekirdeğindeki yoğunluğun (Pu izotopları) geçici değişimi)

Table 3. Percentages of Thorium Burned in Core with Different Graphite Density (Farklı grafit yoğunluğuna sahip çekirdekte yakılan toryum yüzdeleri)

Graphite Density(g/cm^3)	Amount of Thorium Burned (%)
1.65	8.5800
1.8	8.2974
2.16	7.9419

Finally, when investigation of the relationship between graphite density and thorium burning amount; the density of graphite is decreased whereas, the amount of incinerated thorium is increased. This is because the spectra of neutrons shift towards the fast region. Less control of neutrons increases the probability of fast fission.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, neutronic analysis of low power HTGR was performed with a 3D heterogeneous full core model. The following conclusions can also be reached:

- The effective reactivity increases with the increasing density of graphite in the moderator.
- SiC, which has smaller neutron absorption cross sections has a positive effect on reactivity compared to ZrC.
- The burnup value has been computed as 189 GWd/ton and it was observed that the reactor operation time is up to 4500 days when the high-quality graphite used as a moderator.
- The 7.94 percent of the thorium in the fuel was burned when the high-quality

graphite and SiC clad of the fuel pellet were used. The thorium fuel utilization has been demonstrated successfully within the objective of generic investigations.

- Finally, drastic reduction of the nuclear waste material per unit energy output for final waste disposal through extended burn up.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Ahmet ÇİFCİ: The author prepared the serpent code and ran it.

Adem ACIR: literature review and interpretation of results

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. IAEA, (2003), Potential of Thorium Based Fuel Cycles to Constrain Plutonium and Reduce Long Lived Waste Toxicity, IAEA-TECDOC-1349, International Atomic Energy Agency.
2. Şahin, S., Yıldız, K., Acir, A., (2004a), Power Flattening in the Fuel Bundle of a CANDU Reactor, *Nuclear Engineering and Design*, 232(1): 7 – 18.
3. Şahin, S., K. Yıldız, H. M. Şahin, A. Acir (2006a), “Investigation of CANDU Reactors as a Thorium Burner”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, nos. 13 - 14, pp. 1661 – 1675.
4. Sahin, S; Sahin, HM and Acir, A. (2010). Utilization of TRISO fuel with reactor grade plutonium in CANDU reactors, 240 (8) , pp.2066-2074.
5. Sahin, S; Sahin, HM and Acir, A. (2010). Criticality and burn up evolutions of the Fixed Bed Nuclear Reactor with alternative fuels, *Energy Conversion and Management*, 51 (9) , pp.1781-1787
6. Acir, A and Coskun, H (2012). Neutronic analysis of the PBMR-400 full core using thorium fuel mixed with plutonium or minor actinides, *Annals of Nuclear Energy*, 48 , 45-50
7. Mohamed A. Alzamly, Moustafa Aziz, Alya A. Badawi, Hana Abou Gabal, Abdel Rraouf A. Gadallah (2020). Burnup analysis for HTR-10 reactor core loaded with uranium and thorium oxide, *Nuclear Engineering and Technology*, 52, 4, 674-680.
8. I.V. Shamanin (2018). Neutronic7 properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel. *Annals of Nuclear Energy*, 113, 286–293.
9. I.V. Shamanin (2015). Gas-cooled thorium reactor with fuel block of the unified design. *Nuclear Energy and Technology* 1, (2015), 184-190.
10. Petti, D.A., Hobbins, R.R., Lowry, P., Gougar, H., (2013). Representative Source terms and the influence of reactor attributes on functional containment in modular high-temperature gas-cooled reactors. *Nucl. Technol.* 184, 181–197.
11. Rowinski, M.K., White, T.J., Zhao, J., (2015). Small and Medium sized Reactors: a review of technology. *Renew. Sust. Energy Rev.* 44, 643–656.
12. Black, G., Black, M.A.T., Solan, D., et al., (2015). Carbon free energy development and the role of small modular reactors: a review and decision framework for deployment in developing countries. *Renew. Sust. Energy Rev.* 43, 83–94.
13. T. Koyanagi, Y. Katoh, G. Singh M. Snead. (2017) SiC/SiC Cladding Materials Properties Handbook. Nuclear Technology Research and Development.
14. H. C. No (2007). A Review of helium gas turbine technology for high-temperature gas-cooled reactors. *Nuclear Energy and Technology*, 39 (1), 21-30.
15. J. Leppänen, (2015) “Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code”, VTT Technical Research Centre of Finland.
16. Lamarsh, J.R., Baratta, A.J., (2001). Introduction to nuclear engineering, vol. 3. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
17. Moniz, E. (2011). Why we still need nuclear power: making clean energy safe and affordable. *Foreign Affairs*, 83-94.

18. <https://www.ucsusa.org/resources/small-modular-reactors> (Erişim Tarihi: 03:06:2023)
19. Stauff, N. E., Lee, C. H., Shriwise, P., Wells, A., & Filippone, C. (2021). Neutronic Benchmark on Holos-Quad Micro-Reactor Concept. In EPJ Web of Conferences (Vol. 247, p. 01006). EDP Sciences.

Tekerlekli Sandalye Kullanıcılarına Yönelik Engelsiz Yaşam Alanı Projesi

Nihan MUŞ ÖZMEN^{1*}, Pelin ÖZÜBERK², Ayşe GÜNEŞ³

¹Abdullah Gül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri, Turkey

²⁻³Mondi A.Ş., Tasarım Merkezi, Kayseri, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2023
Düzeltilme: 05/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Eşitlik
Engelli dostu mobilya
Engelliler için tasarım
Endüstriyel üretim engelli
mobilyası
Mobilya tasarımı

Article Info

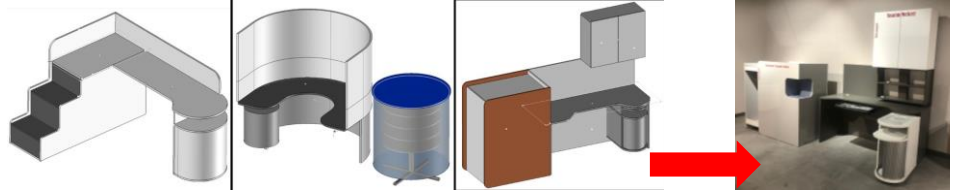
Research article
Received: 29/07/2023
Revision: 05/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Equality
Disabled-friendly furniture
Design for the disabled
Industrial produced
disabled-friendly furniture
Furniture Design

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Araştırmanın hedefleri; yürüme engellilerin asgari ölçekte giyinme, çalışma ve sosyalleşmesi için gerekli ortamın sağlanması; evden çalışmakta olan engelli bireylerin ihtiyaçlarına kolaylıkla erişebilmelerini sağlayacak bir çalışma ünitesi ve modüllerin tasarlanması ve geliştirilmesi; bu mobilyaların ulaşılabilir fiyatlarda seri üretimden çıkmış, servis ve parça garantisi bulunacak nitelikte olmasıdır. / The objectives of the research are to provide the necessary environment for dressing, working, and socializing on a minimum scale for people with walking disabilities; to design and develop a working unit and modules that will meet the needs of disabled people who work from home; to produce affordable furniture with service and warranty.



Şekil A: Tasarım süreci ve projenin son hali / Figure A: Design process and final project

Önemli noktalar (Highlights)

- Engellilere yönelik tasarım açığını keşfeden ve buna yönelik çözüm geliştiren bir proje olması. / Being a project that explores the design gap for disabled people and develops solution for this gap.
- Engelli dostu ve seri üretilebilir bir mobilya olması. / Being a disability-friendly and mass-producible furniture.
- Sadece bir mobilya ile engellilerin bir çok ihtiyacını karşılayacak bir ürün olması. / Having a product that will meet many needs of disabled people with only one piece of furniture.
- Mobilya sektöründe öncülük edecek bir ürün olması. / Being a pioneering product in the furniture sector.

Amaç (Aim): Yürüme engelli bireylere yönelik sosyal sorumluluğun yerine getirilmesi, onların topluma kazandırılması ve yaşamlarına kalite katılması. / Fulfilling the social responsibility for people with walking disabilities, integrating them into society and adding quality to their lives.




Özgünlük (Originality): Seri üretim ağırlıklı mobilya sektöründe engellilere yönelik bir ürün olmaması, bu proje ile bu tip ürünlerin ulaşılabilir hale getirilmesi. / There are no products for the disabled in the mass-produced furniture sector, and this project will make such products affordable.

Bulgular (Results): Engelli mobilya üretimindeki eksiklik neticesinde geliştirilen bu proje ile yürüme engelli bireylerin, çalışma, dinlenme, giyinme vb. bir çok ihtiyacını aynı anda karşılamak mümkün olabilmektedir. / With this project developed because of the lack of disabled furniture production, it is possible to meet many needs of individuals with walking disabilities such as working, resting, dressing, etc. at the same time.

Sonuç (Conclusion): Ana hedef olan tekerlekli sandalye kullanıcılarının ekonomik olarak kolay erişebileceği bir ürün ortaya koymuş olan bu proje sayesinde mobilya sektörüne örnek olmak ve yapılacak birçok tasarımın önünü açmak hedeflenmektedir. / Through this project, an easily accessible and economic project has been developed for the wheelchair users. It is aimed to set an example for the furniture sector and pave the way for many designs.



Tekerlekli Sandalye Kullanıcılarına Yönelik Engelsiz Yaşam Alanı Projesi

Nihan MUŞ ÖZMEN^{1*} , Pelin ÖZÜBERK² , Ayşe GÜNEŞ³ 

¹Abdullah Gül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri, Turkey

²⁻³Mondi A.Ş., Tasarım Merkezi, Kayseri, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2023
Düzeltilme: 05/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Eşitlik
Engelli dostu mobilya
Engelliler için tasarım
Endüstriyel üretim engelli
mobilyası
Mobilya tasarımı

Öz

Engelli bireyler için geliştirilebilecek çözümler ve tasarlanacak uygun donanım ve ekipmanlarla onların herhangi bir yardım almadan yaşamlarına devam etmeleri sağlanabilir. Bu tür düzenlemeler yasal bir zorunluluktan dolayı yapılmak yerine, engellilerin konforunu artırmak için gereklidir. Bu çalışmada, tekerlekli sandalye kullanan engellilere yönelik bir iç mekân düzenleme projesi önerilmektedir. Çalışmanın hedefleri; yürüme engellilerin asgari ölçekte giyinme, çalışma ve sosyalleşmesi için gerekli ortamın sağlanması; evden çalışmakta olan engelli bireylerin ihtiyaçlarına kolaylıkla erişebilmelerini sağlayacak bir çalışma ünitesi ve modüllerin tasarlanması ve geliştirilmesi; bu mobilyaların ulaşılabilir fiyatlarda seri üretimden çıkmış, servis ve parça garantisi bulunacak nitelikte olmasıdır. Ülkemizin en büyük sektörlerinden biri olan mobilya sektöründe engellilere yönelik, onların hayatını kolaylaştıracak çok fazla ürün bulunmamaktadır. Bu çalışma ile bu alandaki boşluğun doldurulması ve sosyal sorumluluğun yerine getirilmesi, yürüme engelli bireylerin topluma kazandırılması ve yaşamlarına kalite katılması amaçlanmaktadır. Bu projenin hedefi yürüme engelli bireyler için bir yaşam alanı konsepti oluşturmaktır. Bu amaçla geliştirilen proje, giyinme dolabı, hareketli depolama alanına sahip çalışma masası, masayla bütünleşmiş ufak depolama ihtiyaçlarını karşılayacak ve servis sehпасı olarak kullanılabilir hareketli bir üniteden oluşmaktadır. Projeye başlarken engelli bireylere yönelik daha önce yapılmış araştırma ve projeler detaylı olarak incelenmiş ve birden fazla fonksiyonu karşılayabilecek kompakt bir ürünün hazırlanması amaçlanmıştır. Sonuçta ortaya çıkan ürün hedeflenen ihtiyaçları karşılayacak düzeyde olup, birçok fonksiyonu içermekte ve tekerlekli sandalye kullanıcılarının kolayca kullanabileceği niteliktedir.

Barrier-Free Living Space Project for Wheelchair Users

Article Info

Research article
Received: 29/07/2023
Revision: 05/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Equality
Disabled-friendly
furniture
Design for the disabled
Industrial produced
disabled-friendly furniture
Furniture Design

Abstract

It can be ensured that disabled individuals can continue their lives without the need for any assistance with suitable solutions and appropriate equipment designs. Arrangements to be made are necessary to increase the living comfort of disabled individuals rather than legal obligations. In this study, a project is proposed for wheelchair users. The objectives of the study are to provide the necessary environment for dressing, working, and socializing on a minimum scale for people with walking disabilities; to design and develop a working unit and modules that will meet the needs of disabled people who work from home; to produce affordable furniture with service and warranty. In the furniture sector, which is one of the largest sectors in our country, there are not many products for the disabled to make their lives easier. With this study, it is aimed to fill the gap in the field and to fulfill social responsibility, to integrate individuals with walking disabilities into society, and to add quality to their lives. The aim of this project is to create a living space concept for people with walking disabilities. The project developed for this purpose consists of a dressing cabinet, a desk with movable storage, and a unit integrated with it, which will meet small storage needs and can be used as a service table. At the beginning of the project, previous research and projects for disabled individuals were examined in detail and a compact and multifunctional product was desired. The final product includes many functions, can meet the targeted needs, and can be easily used by wheelchair users.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Engelli, özürlü ve sakat kavramları gündelik hayatta hepimizin çeşitli nedenlerle, kişilerin çeşitli durumları için bilinçli ya da bilinçsiz kullanılan kavramlardır. Anlamını bilerek, bilmeyerek; karşımızdaki kişide ne gibi izler bırakabileceğini düşünerek, düşünmeyerek; doğru yerde ve şekilde kullanıp, kullanmayarak hepimiz bu sürecin bir parçası olmaktadır. Tüm bireyler hayatları boyunca hiçbir zaman tamamen ve fiziksel olarak yeterli olamazlar. Her insan hayatında dönem dönem hamilelik, bacak kırılması, çocuk olma, çocuk arabasıyla dolaşma vb. süreçler sebebiyle bazı kısıtlılıklar yaşamaktadır. Tüm hayatı boyunca pek az insan sağlıklı ve özürsüzdür. Aksi birçok durumda, (ör. yaşlı olma) zaman zaman çevreye uyum sıkıntısı çekmektedirler [1].

Doğum öncesi, sonrası ve doğum anında meydana gelebilecek bir zedelenme sebebiyle bazı duyu organlarının işlevleri ya azalır ya da tamamen kaybolur. Bu durum ise birtakım becerilerin kısmen veya tamamen yok olması ile sonuçlanmaktadır. Herhangi bir sebeple kısmi ya da tamamen becerilerini yitirmiş olan bu insanları tanımlamak için engelli kavramı kullanılmaktadır. Engelli bireylerin, engelli olarak tanımlanmayan bireylerle eşit sosyal şartlara sahip olamaması durumu ise engellilik hali olarak ifade edilmektedir [2].

2001 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) engellilik için yeni bir tanım ortaya koymuştur. Engellilik kavramı daha önceleri özel bir grubun bazı sınırlılıkları olarak görülürken, *International Classification of Functioning, Disability and Health ICF 2001* (İşlevsellik, Yetiyitimi ve Sağlığın Uluslararası Sınıflandırması ICF 2001) ismi verilen sistemle, beceri ve performans ilişkisine ilk kez odaklanılarak tanımlama yapılmıştır. Herkes hayatının bir noktasında bir sağlık durumu veya bir tür engellilik yaşayabileceğinden, engellilik durumu ilişkili dinamik ve bağlamsal bir değişken olarak görülmüş, az ya da çok özürlü olma durumu, bireylerin kurumsal ve toplumsal çevreleriyle etkileşimlerine dayalı olarak yeniden yorumlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından Engellilik deneyimini azaltmanın ve uluslararası düzeyde herkesin deneyim ve performansını artırmanın önemini vurgulayan evrensel tasarım yaklaşımının temel felsefesiyle uyumlu bir platform oluşturulmuştur [3]. “Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ve Dünya Bankası iş birliğinde ilk kez oluşturulan “Dünya engellilik raporu” verilerine göre dünyada bir milyardan fazla engelli birey bulunmaktadır (WHO, 2011). Bu sayı dünya nüfusunun %15’ine karşılık gelmektedir...” [4].

TÜİK tarafından yapılan Türkiye Özürsüzler Araştırması sonuçlarına göre, ülke nüfusu içinde yer alan engelli oranı %12,29’dur. Buna göre 8.431.937 kişi yaşamlarını engelli olarak sürdürmektedir. Engelli olma durumu ise sadece kişinin kendisini değil, aynı zamanda aile ve yakın çevresini psikolojik, sosyal ve ekonomik boyutlarıyla etkileyen bir sorundur. Engelli bireylerin, “%29,2’si zihinsel özürsüzler, %25,6’sı süregen hastalığı olan özürsüzler, %8,8’i ortopedik özürsüzler, %8,4’ü görme özürsüzler, %5,9’u işitme özürsüzler, %3,9’u ruhsal ve duygusal özürsüzler, %0,2’si dil ve konuşma özürsüzler ve %18’i birden fazla özre sahip olanlardır” [5].

Hastalık, kazalar ve çeşitli sebeplerle bazı organları işlevlerini yerine getiremeyen ve engelli olarak tanımlanan bireyler, normal işlevlerini yerine getirebilen bireylere kıyasla yaşamlarını daha farklı sürdürmek zorunda kalmaktadırlar. Çeşitli nedenlerle zihinsel, bedensel, sosyal, ruhsal veya da duygusal yeteneklerini kaybetmiş kişiler, kimi zaman bu eksikliklerini bazı araç ve gereçlerle telafi edebilmektedir. Ayrıca, insan ömrünün uzamasının doğal bir sonucu olarak istihdam edilebilirlik ve becerilerin değiştiği uzayan bir yaşlanma süreci meydana gelebilir. Yaşam sürecinin farklı aşamalarının farklı gereksinimlere sahip olduğu göz önüne alındığında, tasarımın birçok yönünün kullanıcıyı dikkate alması gerektiği görülmektedir. 1980’lerin ortalarında, çevrenin ve çeşitli ürünlerin eşit şekilde insanlar tarafından kullanılmasını sağlamak için kavramsal bir çerçeve formüle edilmiş ve kamuoyuna duyurulmuştur. Evrensel tasarım, herkes için tasarım gibi birçok farklı adla anılan bu tür yaklaşımlar, dünyanın birçok ülkesinde geçerlilik kazanmıştır [6].

Engelli bireyler, özel yaşam alanlarından başlayarak; günlük faaliyetlerini gerçekleştirme konusunda fiziksel çevrenin uyumsuzluğu dolayısıyla birçok problemle karşılaşmaktadır. Yapılan araştırmalar, tekerlekli sandalye kullanıcılarının yatak odası mobilya ve donatılarını kullanmada büyük problemler yaşadığını, memnuniyet düzeylerinin düşük olduğunu ortaya koymakta ve mobilya sektöründeki büyümenin bu kullanıcıların yaşam kalitesini arttırmada oldukça yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır [5].

Sadece yatak odası mobilyası değil, bugün ülkemizde büyük üretim hacmine sahip olan tüm mobilya sektöründe ağırlıklı olarak sağlıklı kullanıcılara odaklanılmakta ve onlara yönelik mobilya tasarımları yapılmaktadır. Oysaki, evrensel tasarım anlayışından hareketle ve günümüz

teknolojilerinin sunduğu imkanlarla hem sağlıklı hem de engelli bireylerin eşit şartlarda kullanabileceği mobilyaları üretmek oldukça kolaylaşmıştır. Bir bireyin yapabileceği eylemler, engellerine bağlıdır. Engelli dostu çözümler ve ekipman konseptleri, engelli kişilerin yardım almadan yaşamaya devam etmelerini sağlayabilir. Ayrıca, önerilen düzenleme yasal bir zorunluluk olmamakla birlikte engellilerin yaşam konforunu ve dolayısıyla yaşam kalitelerini yükseltmek için gereklidir. Bu çalışmada tekerlekli sandalye kullanıcılarına özel tasarım kaygıları duyulmuş ve proje bu bağlamda geliştirilmiştir.

Makalenin sonraki bölümlerinde öncelikle alanda yapılan çalışmalara bakılarak alandaki eksik nokta tespit edilmiş ve bu çalışmanın doldurduğu boşluk aktarılmaya çalışılmıştır. Daha sonra çalışmanın materyal ve yöntemi üzerinde durulmuş ve projenin detayları anlatılmıştır. Proje detayları prototip görselleri ile zenginleştirilmiştir. Son bölümde ise projenin katkıları üzerinden bir tartışma yürütülmüştür.

Tekerlekli sandalye kullanıcıları için bir iç mekân düzenlemesi yapmayı öngören bu çalışmaya başlarken, alanda daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Engelliler ve engellilik durumu üzerine odaklanmış olan oldukça fazla sayıda çalışma yer almasına rağmen, bunlar genellikle araştırmalar ve onların sonuçları üzerine odaklanmaktadır.

Konuya odaklanan bazı temel kaynak kitaplar Dünya Sağlık Örgütü'nün de bu meseleyi etrafında şekillendirdiği evrensel tasarım ilkelerine dayanmaktadır. *Universal Design: A manual of practical guidance for architects* [7] ve *Universal Design: Solutions for a barrier-free living* [8] kitapları evrensel tasarım yaklaşımlarında dikkat edilmesi gereken unsurlar açısından bu araştırmaya kaynak olmuştur. Benzer şekilde *Barrier-Free planning* [9] isimli kitaptan da eşitlikçi yaşam standartları oluşturmak adına faydalanılmıştır. *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work* [10] kitabı ise ergonomi için gerekli olan antropometrik ölçüler açısından bu çalışmaya kaynaklık etmiştir.

Evrensel tasarım ilkelerine ağırlık veren kitapların yanı sıra ülkemizdeki engellilere odaklanan çok sayıda tez ve makale çalışması da mevcuttur. Bunlar ağırlıklı olarak engelli bireylerin hakları, onların istihdam edilmesi üzerine odaklanırken, başka bir grup tez de engelli kullanıcılara yönelik olan ya da evrensel tasarım ilkelerini referans alan mimari tasarım uygulamalarını ele almaktadır. Tüm bu

çalışmalar öncelikli olarak engellilik tanımlarına ve engellilik türlerine değinmektedir. Bu kapsamda bu alana temas etmiş olan çalışmaların hepsi engellilik meselesini tanımlama ve anlamada bu çalışmaya kaynak olmuştur. *Çalışma yaşamında engelliler: Gümüşhane ili engelli istihdamına ilişkin emek arz yönlü bir araştırma* [11] isimli tez çalışması engelli bireylerin istidamı üzerine yapılmış bir çalışmadır. Ancak tezin başlangıç kısımlarında engellilik meselesi anlatılmakta, engelli bireylerin gündelik hayatta karşılaştıkları sosyal sorunlara değinilmektedir ve bu kapsamıyla bu çalışmaya oldukça yararlı olmuştur.

Tekerlekli sandalye kullanıcılarının yatak odası ve mobilyaları ile ilgili sorunlarının tespiti ve çözüm önerileri makalesi [5] konut içlerinde ve özellikle yatak odalarında tekerlekli sandalye kullanan bireylerin yaşadıkları sıkıntılara yer vermiştir. Araştırmacılar, bu sıkıntıları tespit etmek için farklı şehirlerde tekerlekli sandalye kullanıcıları ile anket yapmışlardır. Çalışmanın son kısmında ise, bu sıkıntılara cevap verebilecek ve daha öncesinde çeşitli tasarımcılar tarafından tasarlanmış olan mobilya örneklerine yer verilmiştir. Bahsi geçen çalışma öncelikli olarak engelli bireylerin yaşadıkları zorlukları anlamak açısından fayda sağlamakla birlikte, bu duruma getirilen çözümler önerilerine yer vermesi açısından da bu çalışmaya örnek teşkil etmektedir. Buradaki örnekler ve yaklaşım şekilleri geliştirilen öneri sırasında göz önünde bulundurulmuştur.

Bir başka tez çalışması olan *Tekerlekli sandalye kullanıcılarının fiziksel iş yapabilme kabiliyetini ölçen ve artıran tekerlekli sandalye ergometresi'nin tasarımı ve imalatı* [12] başlıklı metinde tekerlekli sandalye boyutları ve tekerlekli sandalye kullanıcılarının antropometrik ölçüleri hakkında bilgi verilmektedir ve çalışma bu özelliğiyle bu kullanıcılar için yapılacak tasarımlara yönelik oldukça iyi bir kaynak olma özelliğindedir. *Urban design for disabled people* [13] benzer şekilde tekerlekli sandalyenin boyutları ve kullanıcının ihtiyaç duyduğu hareket alanlarına ait bilgiler verirken, tekerlekli sandalye kullanıcılarının antropometrik ölçülerini içermektedir. *Engellilere yönelik kent mobilyaları üzerine inceleme* [14] çalışmasında ise engellilere yönelik yapılacak tasarımlarda dikkat edilmesi gereken tasarım prensiplerine yer verilmektedir. Bu tasarım prensipleri, uygun ölçüler, esneklik, basit ve sezgisel kullanım, adil kullanım, algılanabilir bilgi, düşük fiziksel güç sarfı ve hata toleranslıdır.

Benzer şekilde kamusal alandaki engelli kullanıcılara yönelik bir araştırma olan *Engelli*

standartlarının Adana kenti açık ve yeşil alanlarında analizi ve uygulama önerileri [15] tezi materyal ve yöntem açısından bu çalışmaya kaynak olmuştur.

İncelenen literatür içerisinde bu çalışmaya içerik bakımından en yakın olan *Bedensel engelliler için mutfaklarda hareketli mobilya ve ekipmanlarının tasarlanması* [16] çalışması, tekerlekli sandalye kullanıcıları için antropometrik ölçüleri belirtilmekte ve onlara yönelik mobilya tasarım önerileri sunulmaktadır. Önerilen mobilya tasarımları mutfak ve yemek yeme mekanlarına yöneliktir. Bu kapsamıyla bu çalışmaya benzer nitelikte olup, farklı mekân ve işlemlere yönelik çözümler önermesi bakımından ayrılmaktadır.

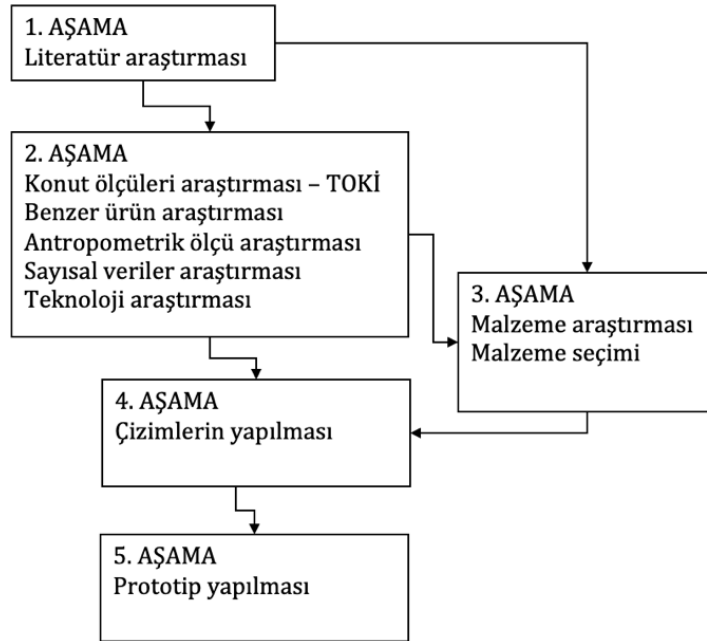
Tekerlekli sandalye kullanıcılarına yönelik bir iç mekân projesi gerçekleştirmeye çalışan bu araştırma, alandaki birçok çalışmadan özel bir gruba yönelik bir ürün ortaya koymasıyla farklılaşmaktadır. Engelli kullanıcılara yönelik çalışmaların çoğu onlarla ilgili alan araştırmalara odaklanıp bu araştırmaların sonuçlarını ortaya koyarken, bu çalışma onların kullanımına yönelik bir ürün önerisi geliştirmekte, engelli bireylerin çalışabileceği bir masa tasarımını içermektedir. Bu anlamda, daha önce yapılmış olan çalışmaların ortaya koyduğu verilerden faydalanmakta ve bunu

bir adım daha öteye götürerek çözüm önerisi sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Araştırmanın amaçlarına ulaşmak için araştırma, problemlerin ve problem alanlarının belirlenmesi, kriterlerin belirlenmesi, çözüm önerilerinin getirilmesi ve uygulanabilirliğinin sağlanması ihtiyacına dayanan beş aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1). Aşamaların altına engelli bireylere yönelik tasarlanacak olan özel mobilyaya girdi ve veri sağlayacak alt başlıklar belirlenmiştir. Bu bağlamda ilk üç aşama farklı konuların araştırılmasından oluşmakta, öncelikli olarak alana genel bir bakışı sağlayan literatür araştırması ile başlamakta olup, daha sonra projeyi detaylandırmaya ve şekillendirmeye yönelik başlıklar altında farklı araştırmalar yapılmıştır. Son iki aşama ise ürünü ortaya koymak üzere yapılan teknik kısımları kapsamaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasını oluşturan literatür araştırması bölümünde, engelliliğin ne olduğu, tanımları, nedenleri ve sınıflandırılması anlatılmaya çalışılmış, alanda yapılan çalışmaların nereye oturduğu ve bu çalışmanın hangi boşluğu dolduracağı üzerinde durulmuştur.



Şekil 1. Araştırmanın akış şeması (Flow of the research)

Araştırmanın ikinci aşamasında proje için girdi sağlayacak bazı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikli olarak TOKİ konutlarının planları incelenmiş ve oda ölçüleri çıkarılmıştır (Şekil 2). Konut planları incelemesi için TOKİ konutlarının seçilme nedeni Türkiye'nin her yerinde

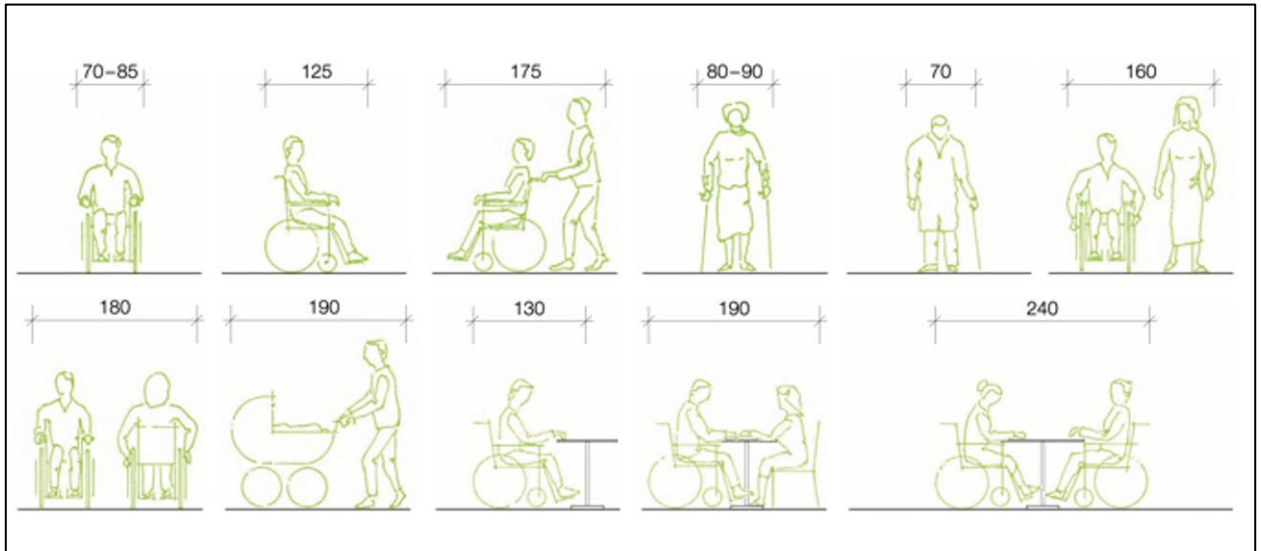
uygulanan standart planlara sahip olması, oldukça fazla sayıda kullanıcı barındırması ve minimum metrekarelerde çözümler üretmesidir. Bu araştırma sayesinde Türkiye'deki konutların ortalama boyutlarının tanımlanması ve bu boyutlara uygun tasarım yapılması hedeflenmiştir.



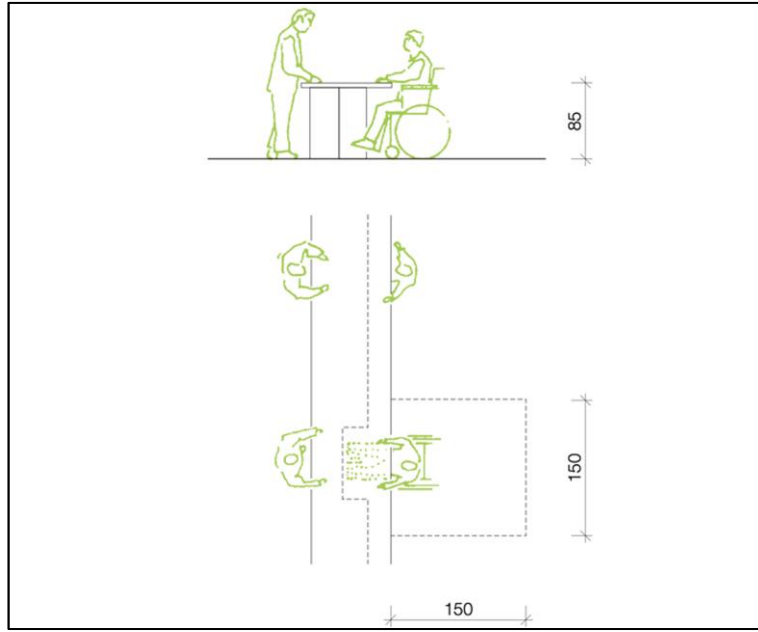
Şekil 2. TOKİ A, B1, C1, D Tipi Kat Planları [17] (TOKİ A, B1, C1, D Type Floor Plans)

Konu üzerinde yapılan bir başka araştırma ise antropometrik ölçülerin incelenmesidir. Bu bağlamda tekerlekli sandalye kullanıcılarının hareket alanları, manevra için ihtiyaç duydukları alanlar, uzanma mesafeleri, tekerlekli sandalyenin ölçüleri vb. veriler yapılan tasarıma girdi olarak kullanılmıştır. Bunun için başlıca faydalanılmış olan kaynak *Neufert: Architect's data* [18] olup,

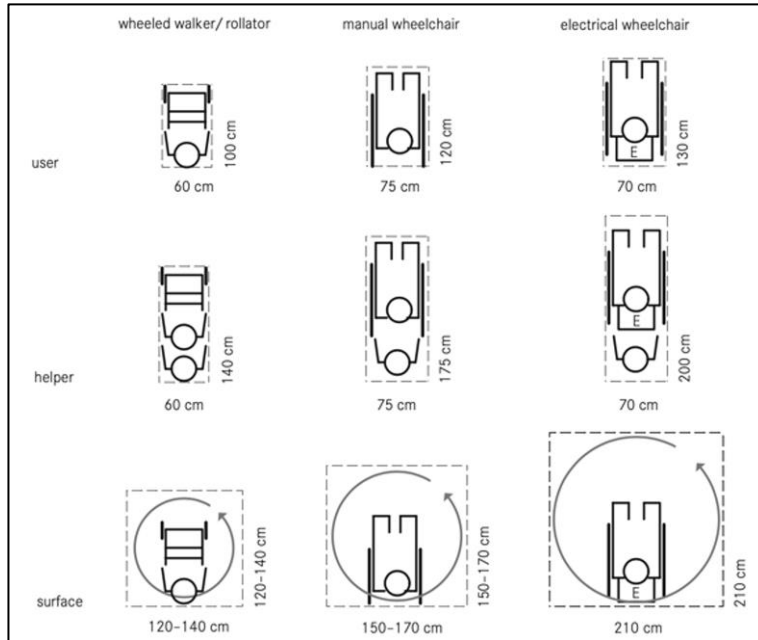
bilimsel yazın taraması bölümünde bahsi geçen kaynaklardan da faydalanılmıştır. Fiziksel engelli bireylerin tekerlekli sandalye ile kapladığı alan, yardım aldığı kişi varsa onunla kapladığı alan ve masa kullanımında kapladığı alan vb. içeren veriler incelenmiştir (Şekil 3). Buna ilaveten masa kullanımında ihtiyaç duyduğu yükseklik ve manevra alanlarına bakılmıştır (Şekil 4-5).



Şekil 3. Tekerlekli sandalye ile kaplanan alan [19] (Space occupied by a wheelchair)



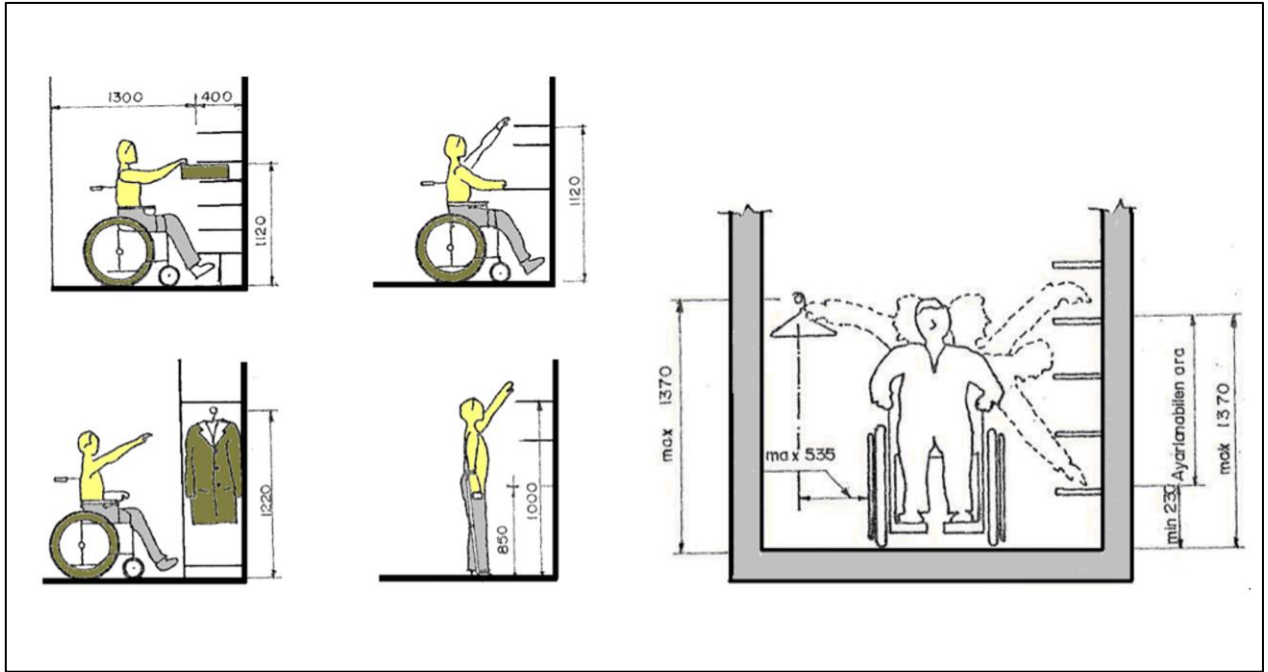
Şekil 4. Masa kullanım ve manevra alanı [19] (Table use and maneuvering space)



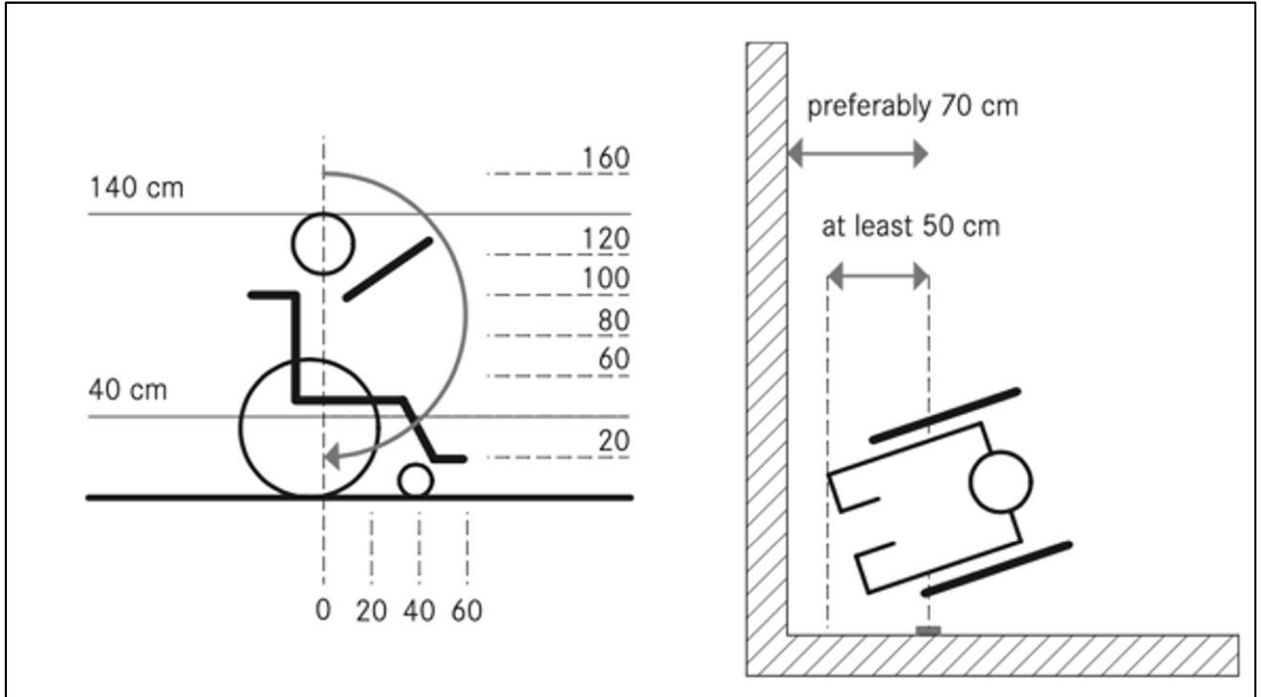
Şekil 5. Tekerlekli sandalye hareket alanı [9] (Wheelchair movement area)

Engelli bireylerin ihtiyaç duyduğu alanların akabinde dolapları kullanma ile ilgili ihtiyaç duydukları boyut ve yer araştırılmıştır. Buna göre, engelli bir bireyin bir dolabı önden kullanma senaryosu için maksimum yüksekliğin 1120 mm, yandan kullanma senaryosu için ise maksimum

yüksekliğin 1370 mm olması gerekmektedir (Şekil 6). Ayrıca Skiba ve Züger'in (2020) yapmış olduğu çalışmada tekerlekli sandalye kullanıcılarının ulaşabileceği çeşitli yükseklikler tanımlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 6. Önden ve yandan dolap kullanımı [16] (Use of cabinets from front and side)



Şekil 7. Tekerlekli sandalye kullanıcısının hareket yarıçapı [9] (Wheelchair user radius of motion)

Araştırma sırasında engelli bireylerin zorluk yaşadığı aktivitelerin oranlarına da bakılmıştır. Çınar ve Erdem [20] yaptıkları çalışmada engelli bireylerin yaşamsal ihtiyaçlarına yönelik eylemlerdeki yapım zorluğunu ve hareketi kısıtlayan mobilya ve donatı elemanlarını ortaya koymuşlardır (Tablo 1-2). Bu çalışmaya göre, katılımcıların yarıya yakını çalışmanın zor, çok zor ve imkânsız olduğunu belirtirken, elbise dolabı,

kitaplık gibi belli boyutlarda tasarlanan mobilyaların ve çalışma masasının kullanımında zorluk yaşadıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca Çınar vd. [5] tarafından yapılmış olan bir diğer çalışmaya göre ise (Tablo 3), engelli bireyler dolaplarda orta, üst ve alt her bölümü kullanmada sıkıntı yaşamaktadır. Alt bölümleri kullanmak nispeten daha kolay olsa da bunu zor bulan birey sayısı da %50'ye yakındır.

Tablo 1. Yaşamsal ihtiyaçlara yönelik eylemleri yapma zorluğu [20] (Difficulty performing actions for vital needs)

Eylemler	Yapım zorluğu %				
	İmkânsız	Çok zor	Zor	Normal	Kolay
Yemek pişirmek	8	18	39	20	15
Yemek yemek	13	0	13	74	0
Bulaşık yıkamak	55	0	0	45	0
Depolama alanlarına ulaşmak	5	27	27	37	4
Yatağa transfer olmak	18	9	31	37	5
Kişisel bakım yapmak	11	0	18	71	0
Banyo yapmak	9	22	35	25	9
Tuvalet ihtiyacı gidermek	9	13	37	36	5
Oturmak	15	22	15	35	13
Çalışmak	16	13	9	58	4
Genel değerlendirme	15.9	12.4	22.4	43.8	5.5

Tablo 2. Hareketleri kısıtlayan mobilya ve donatı elemanları [20] (Furniture and fittings that restrict movement)

Mobilya ve Donatı Elemanları	Kullanım zorluğu %				
	İmkânsız	Çok zor	Zor	Normal	Kolay
Vestiyer	18	22	37	18	5
Mutfak dolapları	18	51	22	9	0
Elbise dolabı	32	27	27	14	0
Yatak	18	15	15	41	11
Koltuk	5	15	27	37	16
Sandalye	27	18	33	20	2
Kitaplık	22	22	34	20	2
Çalışma masası	0	17	24	34	25
Tuvalet masası	0	20	24	40	16
Yemek masası	2	27	51	15	5
Zeminler	18	41	27	9	5
Kapılar	22	36	36	2	4
Pencereler	27	47	20	2	4
Merdivenler	100	0	0	0	0
Genel değerlendirme	22	25.5	27	18.5	7

Tablo 3. Elbise dolabı ve elemanlarının kullanımı [5] (Use of wardrobe and its components)

Eylemler	Yapım zorluğu %			
	İmkânsız	Zor	Normal	Kolay
Kapakları açabilme	0	50	42	8
Çekmeceleri açabilme	0	62	28	10
Üst bölümleri kullanabilme	46	54	0	0
Orta bölümleri kullanabilme	6	90	4	0
Alt bölümleri kullanabilme	0	46	52	2

Bu araştırmalara ilaveten TÜİK üzerinden çekilen verilerde, Türkiye'yi temsilen gerçekleştirilen Engelliler İçin Erişilebilirlik Algısı araştırması [21] incelenmiştir. TÜİK tarafından belirlenen araştırma örnekleminde, 78 kentte 4990 hane adreslerine göre belirlenmiş ve her adresin 2 adet de yedeği belirlenmiştir. Araştırmanın örneklemini her

haneden 18 yaş ve üzeri herkes oluşturmuştur. Araştırma sonunda toplam 3245 haneye ulaşılmış, 4114 kişi ile görüşme gerçekleştirilmiştir. Örnekleme, %47,5 oranında erkekler, %52,5 oranında ise kadınlardan oluşmuştur. Örneklemdaki 18-24 yaş aralığı oranı %10,7, 25-34 yaş aralığı %19,6, 35-44 yaş aralığı, %23,9, 45-54 yaş aralığı

%20,1 ve 55 yaş ve üstü bireyler oranı ise %24,5'tir. Katılımcıların %1,2'si yaşları hakkında yorum yapmamıştır (Tablo 4). Araştırmanın örneklemindeki en büyük grup %33,8 ile ilkökul mezunlarından oluşmaktadır. İlkokul mezunlarını %24,9 ile lise mezunları, %13,2 ile ortaokul mezunları, %12,8 ile üniversite mezunları takip ederken, örneklemin %7,5'ini okur-yazar olmayanlar, %3,4'ünü yalnızca okur-yazar olanlar, %2,2'sini ön lisans mezunları ve %0,7'sini lisansüstü mezunları oluşturmaktadır. %1,5'lik bir

katılımcı grubu eğitim durumu ile ilgili yorumda bulunmamıştır (Tablo 5). Örneklemdaki çalışan oranı %34, çalışmayan oranı ise %64,6'dır. %1,4'ü ise çalışma durumunu belirtmek istememiştir (Tablo 6). Örnekleimde yardımcı araçlara ihtiyaç duymadan veya herhangi bir yardım almadan yürüyemeyenler %7,9 iken, merdiven inip çıkamayanların oranı ise %11,1dir (Tablo 7). Bu sayılar bize yürüme engelli birey oranını vermektedir.

Tablo 4. Engelli bireylerin yaş grubu ve cinsiyete göre dağılımı [21] (Distribution of people with disabilities by age group and gender)

Yaş grubu Age group	2012			2014			2016			2019		
	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female
Toplam-Total	11,6	8,3	14,9	17,4	12,6	22,1	17,5	12,1	22,8	15,3	11,1	19,4
15-44	4,2	3,3	5,0	7,6	6,0	9,2	6,5	4,8	8,3	5,7	3,9	7,6
45-54	13,2	9,0	17,4	22,3	15,0	29,6	21,8	14,8	28,9	17,0	13,2	20,7
55-64	21,1	12,7	29,2	31,0	20,9	40,8	30,0	18,2	41,6	24,5	17,3	31,5
65-74	38,6	29,0	46,6	48,4	37,7	57,3	50,5	40,2	59,3	40,3	29,5	49,7
75+	63,3	57,7	67,1	73,6	65,5	79,0	72,5	60,0	80,7	67,0	62,1	70,3

Tablo 5. Engelli bireylerin eğitim durumu [21] (Education status of disabled people)

	2012			2014			2016			2019		
	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female
Okuryazarlık durumu- Status of literacy												
Okuma yazma bilmeyen Illiterate	36,6	16,8	47,2	31,9	13,9	42,0	30,6	11,9	40,4	25,9	10,9	34,4
Okuma yazma bilen Literate	63,4	83,2	52,8	68,1	86,1	58,0	69,4	88,1	59,6	74,1	89,1	65,6
Öğrenim durumu- Educational status												
Bir okul bitmedi No school completed	17,2	15,6	18,5	42,1	24,7	51,9	40,6	20,9	50,8	35,7	18,1	45,6
İlkokul Primary school	59,8	57,3	61,9	39,4	45,8	35,8	39,7	48,4	35,2	41,3	50,4	36,2
İlköğretim veya ortaokul Primary education or junior high school	10,1	11,6	8,8	7,3	12,3	4,5	7,7	11,0	5,9	8,5	12,3	6,4
Lise ve dengi okul High school or equivalent	8,8	10,5	7,5	7,1	10,2	5,3	7,7	12,0	5,5	8,3	10,4	7,1
Yükseköğretim Higher education	4,2	5,0	3,4	4,2	7,1	2,5	4,3	7,7	2,5	6,2	8,8	4,8

Tablo 6. Engelli bireylerin çalışma durumu [21] (Working status of disabled people)

	2012			2014			2016			2019		
	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female
İşteki durum-Position at work												
Ücretli, maaşlı veya yevmiyeli Regular, waged or casual	54,4	60,0	46,2	60,6	67,3	52,7	57,1	63,9	49,7	58,1	57,7	58,8
İşveren Employer	1,4	2,1	0,4	2,2	3,1	1,1	2,5	4,1	0,7	4,9	6,9	1,8
Kendi hesabına çalışan Self employed												
Ücretsiz aile işçisi Unpaid family worker	27,2	36,7	13,1	18,2	27,6	7,2	19,9	30,1	8,8	23,8	33,1	10,3
	17,0	1,2	40,3	19,1	2,0	39,0	20,6	1,9	40,8	13,2	2,3	29,0
Çalışma durumu- Employment status												
Çalışan Employed	16,6	29,9	9,4	19,3	34,1	11,0	19,6	31,4	13,5	19,9	32,9	12,6
Çalışmayan Non-employed	83,4	70,1	90,6	80,7	65,9	89,0	80,4	68,6	86,5	80,1	67,1	87,4

Tablo 7. Yardım almadan yürüyemeyenler [21] (Those who cannot walk without assistance)

	2012			2014			2016			2019		
	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female	Toplam Total	Erkek Male	Kadın Female
Yürüyemeyenler Not able to walk	4,5	2,7	6,3	7,3	4,1	10,4	6,5	4,0	8,9	5,5	3,1	7,9
15-44	2,3	2,0	2,5	1,7	1,3	2,1	1,3	1,4	1,1	0,8	0,5	1,1
45-54	3,2	2,2	4,3	6,8	3,4	10,4	5,1	2,7	7,6	4,4	2,9	6,0
56-64	8,1	3,9	12,1	12,9	5,2	20,5	10,8	4,3	17,1	8,2	4,3	12,0
65-74	20,3	11,7	27,5	24,3	15,3	31,9	23,4	15,4	30,2	17,1	9,3	23,9
75+	39,9	29,9	46,8	51,2	38,3	59,7	48,0	36,0	55,8	44,7	32,0	53,1
Merdiven inip çıkamayanlar Not able to walk up and down stairs	5,3	3,1	7,4	9,0	5,1	12,8	8,7	5,0	12,4	7,9	4,6	11,1
15-44	2,8	2,2	3,5	2,4	1,7	3,2	1,9	1,7	2,2	1,5	1,0	2,0
45-54	3,5	2,1	4,9	9,0	3,9	14,2	8,8	4,2	13,4	7,5	4,5	10,6
56-64	10,8	5,1	15,1	16,3	7,1	25,2	15,4	6,5	24,1	12,9	6,7	18,9
65-74	22,8	13,2	30,6	30,7	19,6	40,1	29,3	18,6	38,5	24,7	13,6	34,3
75+	44,5	34,7	51,2	53,6	42,1	61,3	55,4	39,8	65,7	50,8	39,0	58,7

Buna ilaveten, TÜİK'in Ocak 2022 Engelli ve Yaşlı İstatistik Bülteni'nde [22] yer alan verilere göre tüm yaş grupları içinde en az bir engeli olanların oranı %6,9 dur (Tablo 8). Bunlardan %7,4'ü yürümede,

merdiven çıkıp inmede ve bir şeyler taşıma ve tutmada zorluk yaşamaktadır (Tablo 9). Bu oran da toplam engelli birey içindeki fiziksel/ortopedik engelli birey oranını vermektedir.

Tablo 8. Genel nüfus içindeki en az bir engeli olan nüfus [22] (Population with at least one disability in general)

Engelli Birey	Nüfus Oranı (%)	Erkek (%)	Kadın (%)
Tüm yaş grupları	6,9	5,9	7,9
3-9	2,3	2,5	2,1
10-14	2,1	2,4	1,8
15-19	2,3	2,6	2,0
20-24	2,7	3,4	2,0
25-29	2,6	3,0	2,3
30-34	3,2	3,4	3,0
35-39	4,0	4,0	4,1
40-44	5,1	4,7	5,6
45-49	6,9	5,9	7,8
50-54	8,8	7,1	10,7
55-59	12,1	9,2	15,0
60-64	16,5	12,3	20,4
65-69	23,0	18,3	27,2
70-74	31,9	26,3	36,3
75+	46,5	40,9	50,3

Tablo 9. Genel nüfus içindeki engel durumuna göre nüfus oranı [22] (Proportion of the population by disability status in general)

Engelli Birey	Toplam Nüfus Oranı (%)	Erkek (%)	Kadın (%)	Toplam (Kişi sayısı)	Erkek (Kişi sayısı)	Kadın (Kişi sayısı)
Görmede zorluk yaşayanlar	1,4	1,3	1,5	1.039.000	478.000	561.000
İşitmede zorluk yaşayanlar	1,1	1,1	1,2	836.000	406.000	429.000
Konuşmada zorluk yaşayanlar	0,7	0,8	0,6	507.000	278.000	229.000
Yürümede, merdiven çıkamada/inmede zorluk yaşayanlar	3,3	2,4	4,1	2.313.000	861.000	1.452.000
Bir şeyler tutmada/taşımada zorluk yaşayanlar	4,1	3,2	5,1	2.923.000	1.136.000	1.787.000
Yaşlılarına göre öğrenmede/basit dört işlem yapmada/hatırlamada/dikkatini toplamada zorluk yaşayanlar	2,0	1,6	2,4	1.412.000	565.000	847.000

TÜİK'ten alınan veriler ülkemizdeki engelli birey sayısının ne kadar fazla olduğunu ve onların da yardıma ihtiyacı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu oranlar yapılan proje kapsamında doğru bir gruba odaklanıldığını göstermektedir. Türkiye Sağlık Araştırması 2019'daki örnekleme okumalılık düzeyinin de yüksek olduğu görülmektedir. Tüm bu veriler ele alındığında engelsiz yaşam alanı projesi oluşturmak ve içeriğinde düşünülen çalışma masası, kitaplık, komodin, gardırop gibi ürünleri tasarlayarak geliştirmek okuyan ya da çalışan yürüme engelli bireylerin yaşam konforlarını arttırmada rol üstlenecektir.

Çalışmanın ikinci aşamasında gerçekleştirilmiş olan bir başka araştırma ise proje kapsamındaki ürün benzer bir ürünün daha önce yapıp yapılmadığı araştırmasıdır. Ülkemizde mobilya sektöründeki büyük markalar çoğunlukla seri üretim yapmaktadır. Bu markaların ürünleri bu kapsamda incelenmiş ve tekerlekli sandalye kullanıcıları için herhangi bir ürün yapılmamış olduğu

gözlemlenmiştir. Bu noktada mobilya sektöründe doldurulması gereken bir açık olduğu aşikârdır.

Engelli kullanıcılara yönelik yapılan çalışmalar yarışma projelerinden ibarettir. Örneğin, İç Mimarlar Odası İstanbul Şubesi ve AYDER'in (Alternatif Yaşam Derneği) düzenlediği, *Engelsiz Kişisel Yaşam Alanı (oda) ve Mobilya Tasarım Yarışması* [23] bünyesinde engellilere yönelik farklı tasarımlar geliştirilmiştir. Fakat bu projeler fikir düzeyinde kalmıştır. Bu yarışmaların da amacı olan ve önemli olan geliştirilmiş ve geliştirilecek olan projelerin hayata geçirilmesi ve engelli bireylerin hayatına kolaylık getirilmesidir.

Bunun haricinde internet kaynakları üzerinden yapılmış ürün araştırmasında engellilere yönelik hazırlanan bazı tasarım ürünlerine rastlanmıştır. Bu ürünler içerisinde mutfak, yatak odası gibi mekanlar için geliştirilen tasarım örneklerini görmek mümkündür (Şekil 8-9).



Şekil 8. Engellilere yönelik mutfak tasarımı [24] (Kitchen design for disabled people)



Şekil 9. Engellilere yönelik yaşam alanı tasarımı [25] (Living space design for disabled people)

Bu çalışmaya girdi sağlayan araştırmaların bir diğeri ise teknolojik alanda yapılan çalışmalar olmuştur. Gelişen teknolojilerin mobilyaya nasıl

entegre edildiği ve bunların planlanan tasarıma nasıl uygulanabileceği konusunda da örnekler araştırılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Engelli dostu mutfak tasarımında teknoloji [26] (Technology in disabled-friendly kitchen design)

Araştırmanın üçüncü aşamasında malzeme araştırması ve seçimi yapılmış, ürünün yapılmasını sağlayacak ve mobilyada kullanılan standart malzemelerin (suntalam, bağlantı elemanları vb.) yanı sıra ürüne özel çözümler için yeni malzemeler araştırılmış ve uygun firmalardan bu malzemeler tedarik edilmiştir. Tüm bu aşamalardan sonra ürünün çizimlerine başlanmış, araştırmalar ve seçilmiş olan malzemelere göre tasarım geliştirme sürecine geçilmiştir. İlk yapılan çizim üzerinde farklı görüşler alınarak tasarım daha da geliştirilmiştir. Bu şekilde ilerleyen süreçte son prototipe karar verene kadar altı farklı çizim yapılmıştır. Son aşamada ise karar verilmiş olan nihai ürünün prototipi hazırlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yapılan tüm bu araştırmalar sonucunda mobilya sektöründe engelli bireylere yönelik bir eksikliğin olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar dönem dönem açılan tasarım yarışmalarıyla bu duruma dikkat çekilmeye çalışılsa da sektör bu konuda tam anlamıyla bir yol kat edememiştir. Tasarımcılara düşen görev, eşitlikçi bir yaklaşımla toplumun parçası olan tüm bireylerin kullanabileceği mekanlar ve ürünler tasarlamaktır. “Engelsiz bir ortam; özgür ve güvenli harekete ve işleve izin veren ve ayrıca yaş, cinsiyet ve durum ne olursa olsun herkesin ulaşabileceği bir mekândır.” [27].

Ülkemizde engelli bireyler yapılı çevre ile sınırlı ilişki kurmaktadır. Bunun nedeni karşılaşılan engellerin oldukça fazla olması ve fiziksel düzenlemelerde yetersiz kalınmasıdır. Engelli bireyler ancak kendi başlarına güçlüklerle hareket ederek ya da başka bir kişinin desteğiyle çevreyle ilişki kurmaktadır. Onların güncel yaşama aktif ve eşit bir şekilde katılmalarını sağlamak için yapılması gereken mekânsal düzenlemelerin engelli bireylerin hareket gerekliliklerini düşünerek

planlanmasıdır. Günümüzde Türkiye’de engelli bireyler, sağlık, eğitim, vb. temel gereksinimlerine ulaşırken, kültürel ve sportif faaliyetlere katılırken hala zorlanmaktadır [28]. Erişilebilirlik konusunda yapılmış olan bir araştırmada engelli bireyler ile bir anket gerçekleştirilmiştir. Bu ankete göre engelliler istihdam edilmek ve vakitlerini sağlıklı insanlarla benzer biçimde geçirmek istediklerini belirtmiş, çevreden ve toplu ulaşım sistemlerinden kaynaklanan problemlerin çözülmesini talep ederek, eve hapsolmek istemediklerini belirtmişlerdir [29].

Sadece engelli ihtiyacı üzerinden bakmak yerine, problemin insan gereksinimleri temelinde ele alınması ve bütün insanların hayatta aktif rol almalarını sağlayacak bir tasarım anlayışı ile herkes için eşitlikçi ve daha yaşanabilir çevreler oluşturmak mümkündür [5]. Günümüzdeki bakış açısıyla evrensel tasarım, tüm yapılı çevre ve tasarım ürünlerinin yaş, yetenek ve durumdan bağımsız, çok sayıda kişinin kullanımına imkân sağlayan, bütünleştirici bir tasarım anlayışıdır [1].

Mobilya insanların gündelik hayatında yeme, içme, oturma, depolama gibi genel ihtiyaçlarının yanında sosyal ve psikolojik gereksinimlerini de karşılayan sabit veya hareketli eşyalardır. Başka bir deyişle, estetik ve işlevsel olarak içinde yer aldığı mekânın değerini etkileyen bu donatı aynı zamanda teknikle sanatı birleştirmektedir. “Bu bağlamda gerek konut mekânlarında gerekse işyeri mekânlarında, insan yaşamının geçtiği bütün mekânları daha kullanışlı, daha konforlu hale getiren, kişi ve toplumun sağlıklı gelişimini sağlayan bir faktör olarak da önem arz ettiği söylenebilir” [30].

Gündelik hayatın büyük bir parçası olan ve yapılı çevredeki hareketlerimizi engelleyen ya da kolaylaştıran mobilyanın tasarımı oldukça önem arz

etmektedir. Herhangi bir engeli bulunmayan bireylerin dahi gündelik hayat kalitesini özellikle sunduğu çözümlerle sağlaması beklenen mobilya eşitlikçi bir yaklaşım gözeterek tasarlanmalıdır. Eşitlikçi yaklaşımı temel alan ve engelli bireylerin rahatça kullanabileceği bir mobilya çözümü herkes tarafından kullanılabilir bir pratiklikte olacaktır. Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan mobilya böyle bir anlayışı içermektedir.

3.1. Engelsiz Yaşam Alanı Projesi (Barrier-Free Living Space Project)

Bu proje Türkiye'deki mobilya firmalarının ürünleri üzerinde yapılan araştırma neticesinde engellilere yönelik bir ürünün bulunmaması, sektörün ileri gelen kuruluşlarının bu yaklaşımda öncü olması gerektiği fikri sonucunda ortaya çıkmıştır. Engellilere yönelik mobilya tasarımlarının kısıtlı olması ve bunların daha çok yarışma projeleri kapsamında tasarlanıp fikir düzeyinde kalması bu alanda eksiklik oluşturmaktadır. Bu eksikliği kapatmak için sektörün öncü firmalarından Mondi A.Ş. Tasarım Merkezi bünyesinde engelsiz yaşam alanı üzerine bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Amaçları (Aims)

Bu projeyi ortaya koyarken bazı tartışmalar projenin amaçlarını belirlemede rol oynamıştır. Türkiye mobilya sektöründe marka olmuş firmaların yürüme engelli insanlar için ürün yapmamış olması, yürüme engelli insanların topluma kazandırılması ihtiyacı, firmaların ağırlıklı olarak para kazanma odaklı çalışmalar yapmaları tartışmaları neticesinde şu amaçlar ortaya çıkmıştır:

- Mobilya sektöründeki büyük firmalardan olan Mondi A.Ş. tarafından engelli mobilyası tasarlanarak buradaki boşluğun doldurulması,
- Tasarlanan mobilya sayesinde sosyal sorumluluğun yerine getirilmesi,
- Mobilya firmalarının ülkenin sosyal sıkıntılarında da yönelik ürünler geliştirmesi,
- Yürüme engelli insanların yaşamlarına kalite katarak, bu insanların karamsarlıktan kurtulması ve topluma kazandırılmasının sağlanması,
- Engelli ünite/mobilyalarının hayata geçirilmesi sayesinde mekânların daha verimli kullanılması ve kullanıcı konforuna katkı sağlanması.

Tasarlanmış olan bu ürün içerdiği özellikler bakımından yukarıdaki amaçları sağlamaktadır.

Tasarlanan bu üründen finansal faydadan ziyade toplumsal fayda sağlamak hedeflenmiştir.

3.1.2. Tasarım Kriterleri (Design Criteria)

Tekerlekli sandalye kullanıcılarına yönelik olan bu projeyi geliştirirken farklı tasarım kriterleri üzerinde durulmuştur. Yapılan araştırmalardan esinlenilerek boyut, ergonomi, ihtiyaçları karşılayacak teknolojiler, uygun malzeme ve ekipman, maliyet gibi birçok farklı unsur kriterleri belirleme rol oynamıştır. Öncelikli dikkat edilen unsur bunun bir mobilya tasarımı olduğudur. Bu bağlamda incelenmiş olan konut planlarında odalar için ayrılmış metrekareler dikkate alınmış, odalarda kullanılabilecek olan yatak boyutları sonrası kalan kullanım ve hareket alanı göz önüne alınmıştır.

Daha sonraki aşamada ise kalan alanda yürüme engellilerin asgari ölçekte giyinme, çalışma ve sosyalleşmesine yönelik mobilya tasarımının yapılması için gerekli boyutlar çıkarılmıştır. Tasarlanacak olan mobilya ev ortamında çalışmakta olan engelli bireylere hizmet edeceği için onların ihtiyaçları çıkarılmış ve bunları karşılayacak olan mobilyayı gerçekleştirmek için gerekli malzeme, kullanılacak ekipman ve teknolojiye karar verilmiştir.

Sonuçta tasarlanan çalışma mobilyası, evden çalışan tekerlekli sandalye kullanıcılarının ihtiyaçlarına kolaylıkla erişebilmelerini sağlayacak şekilde tasarlanmış ve buna bağlı modüller geliştirilmiştir. Bir diğer önemli kriter olan bu mobilyaların ulaşılabilir fiyatlarda seri üretimden çıkmış, servis ve parça garantisi bulunacak nitelikte olması ise temel amaçtır.

3.1.3. Teknik Özellikleri (Technical Specifications)

Tekerlekli sandalye kullanıcıları için tasarlanmış olan mobilya çalışma ve depolama fonksiyonlarını içermektedir. Mobilya tasarlanırken yapılan araştırmalardaki gerekli antropometrik ölçüler, ergonomi, maliyet gibi faktörler göz önünde bulundurulurken, bir mobilyanın kullanıcının beğenisine hitap etmesini sağlayan en önemli faktör olan estetik de dikkate alınmıştır.

Tüm bu faktörler ışığında ortaya çıkan tasarım, çalışma masası, klavyelik, çalışma masası üstü asansörlü depolama alanı, çalışma masası altı hareketli depolama alanı ve giysi depolama alanlarından oluşmaktadır. Projede kullanılan malzeme listesi şu şekildedir:

- Lift Column (Lift Alet): Rafların otomatik olarak aşağı inmesini sağlamaktadır. Ayrıca giyinme dolabı kapağının otomatik açılması için de kullanılmıştır.
- Elektrik Seti: Lift mekanizmasının çalışması için gerekli olan güç kaynağı ve uzaktan kumandadan oluşmaktadır.
- Comfort Spin: 360 derece dönebilen, depolama ve servis alanlarında kolaylık sağlayan malzemedir.
- Fare altlığı da olan klavye çekmecesi klavye için ayrı bir alan oluşturarak ürünün konforunu arttırmak için kullanılmıştır.
- Sabit Maşalı Şeffaf Teker: Mobilyanın hareketli parçalarının altında kullanılmıştır.
- Döner Teker: Mobilyanın hareketli parçalarının altında kullanılmıştır.
- Ebatlanmış Stor Sistemi: Mobilyanın stor kapak kısımlarında kullanılmıştır.

Bahsi geçen bu malzemeler tasarımın özelleşen yönlerinde kullanılan malzemeler olup, bunların haricinde mobilyalarda standart olan bazı malzemeler de kullanılmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. Projede kullanılan tüm malzeme listesi (List of all materials used in the project)

Dübelli Mil	Baza Pabucu Beyaz
Çektirme Gövde Ø15x14mm	Döşeme çivisi 80/14 pls kt(boyalı)boyalı
Kavela Ahşap Ø8x32mm	Lift Column
Vida Yhb 3.5x16mm Sunta	Elektrik Seti
Vida Yhb 3.5x20mm Sunta	Comfort Spin
Suntalam 18 mm Ç.Y.Side Beyaz	Fare Altlığı Olan Klavye Çekmecesi
8 YL boyalı arkalık	Sabit Maşalı Teker
K.Bant Pvc Side Beyaz 21x1 mm G20	Döner Teker
K.Bant Pvc Side Beyaz 0,4 mm G20	Ebatlanmış Stor Sistemi

Tasarlanmış olan mobilyanın seri üretime uygunluğu bu proje kapsamındaki diğer bir tasarım kriteridir. Projenin seri üretim bandındaki cihazların

kullanılarak üretilmesi mümkündür. Tablo 11 de yer alan listede kullanılan makine listesi verilmiştir.

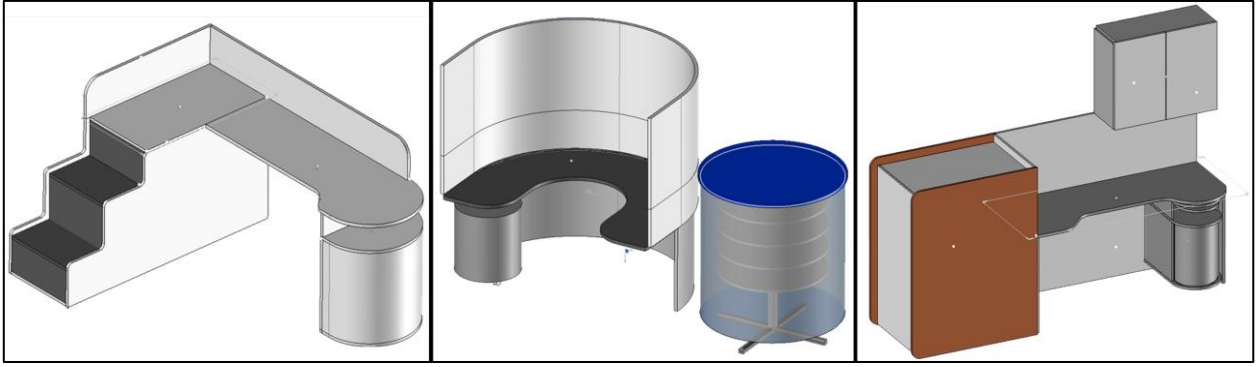
Tablo 11. Projede kullanılan makine listesi (List of machines used in the project)

Sunta ebatlama ve kesme makinesi
Laminasyon kaplama makinesi
Kenar işleme makinesi
Delik makinesi
Yatar daire testere
Tek düz kenar işleme makinesi
Baz yüzey işleme makinesi (pvc çekme makinesi)
Freze tezgâh

3.1.4. Tasarım, Teknik Çizim ve Prototip (Design, Technical Drawing and Prototype)

Ürünün tasarımı yapılırken ilk olarak çalışma masası, kitaplık, keson, giyinme dolabı üniteleri bir arada düşünülerek bir çizim yapılmıştır. Daha sonra farklı bir tasarım yaklaşımı ile yuvarlak hatlara sahip bir tasarım yapılmıştır. Kullanım kolaylığı açısından giyinme dolabı bir önceki tasarımdan farklı olarak ayrı bir ünite şeklinde düşünülmüştür.

Geliştirilen tasarımın son aşamasında, bir önceki aşamadaki işlevler korunarak çizgisel olarak daha düz hatlara sahip olan bir tasarıma karar verilerek tasarım son formuna kavuşmuştur. Son durumda giyinme dolabı ve çalışma masası yine ayrı birer modül olarak düşünülmüş, mekânın durumuna göre bir arada ya da yarı ayrı kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Her bir modül tekerlekli sandalye kullanıcısının ihtiyaçlarına ve erişme mesafelerine göre ayarlanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Ürünün tasarım aşamaları (Phases of the design)

Çalışma masasının üst kısmındaki depolama alanı içinde bulunan raflarda lifting column kullanılmıştır ve bu sistem elektrik setinin kumandasıyla aşağı indirilmektedir (Şekil 12). Aynı mekanizma giyinme dolabına da entegre edilerek; giyinme dolabı kapağının da açılıp kapanması uzaktan kumandalı sistemle çözülmüştür. Giyinme

bölümünün yüksekliği tekerlekli sandalye ile ulaşılabilir şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda içinde kullanılan aydınlatma ile içerisinin kullanım konforu artırılmıştır (Şekil 13). Giyinme dolabının kapak olmayan kısmında ufak bir depolama ve kullanım alanı oluşturulmuştur (Şekil 14).



Şekil 12. Çalışma masası elektrikli raf sistemi (Electric shelving system of the table)



Şekil 13. Giyinme dolabı elektrikli lift sistemi ve iç aydınlatması (Electric lift system and interior lighting of the closet)



Şekil 14. Giyinme dolabı açık depolama alanı (Open storage area of the closet)

Çalışma masasının alt kısmındaki keson, altındaki tekerler sayesinde hareket edebilmekte, ihtiyaç durumuna göre bağımsız bir ünite olarak da

kullanılabilmektedir. Altındaki depolama alanında ise stor kapak kullanılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Çalışma masası kesonu (Caisson of the table)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yürüme engelliler için yapılmış mobilya tasarımları daha öncesinde sadece yarışma konusu olarak ele alınmış ve içselleştirilmemiştir. Mobilya sektörü ülkemizin güçlü olduğu alanlardan biri olarak bu meseleyi gündemine alıp, seri üretimle kolay ulaşılabilir hale getirebilir. Ancak bugüne kadar hiçbir mobilya firması bu konuda bir adım atmamıştır. Bu konuda yapılacak olan bir çalışma buradaki boşluğu doldurmasının yanı sıra öncü firmaların bu konudaki sosyal sorumluluğunu da yerine getirmiş olacaktır.

Bu proje, tekerlekli sandalye kullanıcılarının topluma kazandırılması ve yaşamlarına kalite katılarak bu bireylerin karamsarlıktan kurtarılması düşüncesiyle geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalye kullanıcılarının ihtiyaçları, hareket kabiliyetleri ve hareket alanları göz önünde bulundurularak, yaşam alanlarında ihtiyaç duyacakları çözümler üretilmiştir. Farklı modüllerden oluşan ve her bir modülünün farklı hareket kabiliyeti olan bu proje aynı zamanda seri üretimle üretilebilir şekilde tasarlandığı için kolay ulaşılabilir bir üründür.

Tasarlanmış olan ürün tekerlekli sandalye ile kullanılabilir bir çalışma masası olup aynı zamanda depolama ve giysi dolabı fonksiyonlarını da içermektedir. Kullanıcıların üst raflara ve giysi dolabına kolay erişimini sağlamak için bu kısımlarda elektrikli mekanizma kullanılmıştır. Bu mekanizma bir kumanda yardımı ile çalışmaktadır.

Ayrıca ünite altında kullanılan keson hareketli olup, ihtiyaca göre istenilen yere taşınabilmektedir. Keson üzerinde yer alan 360 derece dönebilen Comfort spin malzemesi de dönme özelliği sayesinde kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.

Tüm bu yenilikçi çözümleri, kullanıcılarına yönelik detay ve ölçüleri ve en önemlisi seri üretim ile üretilebilir olması özellikleri ile bu mobilya bir örnek teşkil etmektedir. Ana hedef olan tekerlekli sandalye kullanıcılarının ekonomik olarak kolay erişebileceği bir ürün ortaya koymuş olan bu proje sayesinde mobilya sektörüne örnek olmak ve yapılacak birçok tasarımın önünü açmak hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu tasarım Mondi A.Ş. Tasarım Merkezi tarafından geliştirilmiştir ve Abdullah Gül Üniversitesi ve Mondi A.Ş. iş birliği ile yayına dönüştürülmüştür. Makale ile ilgili kurumlar ve kişiler arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nihan MUŞ ÖZMEN: Literatür araştırması yapmış, süreci takip etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the literature research, followed the process and carried out the writing process

Pelin ÖZÜBERK: Projenin hazırlık, araştırma, prototip aşamasını gerçekleştirmiş ve makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

She carried out the preparation, research, prototype phase of the project and contributed to the writing of the article.

Ayşe GÜNEŞ: Projenin başlangıç ve bitiş raporlamalarını hazırlamış, süreci takip etmiş ve makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

Projenin başlangıç ve bitiş raporlamalarını hazırlamış, süreci takip etmiş ve makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zeyrek Çepehan, İ. & Güller, E. (2020). Evrensel tasarım kapsamında herkes için erişilebilir tasarım. Sosyal Politika Çalışmaları Dergisi Erişilebilirlik Özel Sayısı, 2, 383-410.
- [2] Samanlı, R. (2021). Birleşmiş Milletler'in engelsiz yaşamı oluşturma çabaları doğrultusunda sosyal koruma politikalarının değerlendirilmesi. Uluslararası Sosyal Bilimlerde Yenilikçi Yaklaşımlar Dergisi, 5(1), 15-33.
- [3] Dostoğlu, N., Şahin, E. & Taneli, Y. (2009). Dosya – Tasarıma kapsayıcı yaklaşım: Herkes için tasarım. Evrensel tasarım: Tanımlar, hedefler, ilkeler. Mimarlık, 347.
- [4] Demir Mishchenko, E. (2014). Herkes için/ile tasarım: Evrensel tasarıma katılımcı bir yaklaşım deneyimi. Mimarist, 2, 105-111.
- [5] Çınar, H., Arslan, A. R., & Meriç, H. (2015). Tekerlekli sandalye kullanıcılarının yatak odası ve mobilyaları ile ilgili sorunlarının tespiti ve çözüm önerileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), 309-318.
- [6] Arap, S. K., Yücebaş, E., & Arap, İ. (2021). Yerel yönetimlerin engelsiz yaşam hedefi: İzmir Büyükşehir Belediyesi örneği. Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9(1), 139-156.

- [7] Goldsmith, S. (2000). Universal Design: A Manual of Practical Guidance for Architects. Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- [8] Herwig, O. (2008). Universal Design: Solutions for a Barrier-free Living. Birkhäuser.
- [9] Skiba, I. & Züger, R. (2020). Basics Design: Barrier-free Planning. Birkhäuser.
- [10] Pheasant, S. (2003). Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and The Design of Work. Taylor & Francis.
- [11] Ölmezoğlu, N. İ. (2015). Çalışma Yaşamında Engelliler: Gümüşhane İli Engelli İstihdamına İlişkin Emek Arz Yönlü Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [12] Geyik, H. (2006). Tekerlekli Sandalye Kullanıcılarının Fiziksel İş Yapabilme Kabiliyetini Ölçen ve Artıran Tekerlekli Sandalye Ergometresi'nin Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [13] Gökçen, T. (1999). Urban Design for Disabled People, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [14] Karakuş, M. K. (2016). Engellilere Yönelik Kent Mobilyaları Üzerine İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi, İstanbul.
- [15] Özcan, Y. (2008). Engelli Standartlarının Adana Kenti Açık ve Yeşil Alanlarında Analizi ve Uygulama Önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [16] Mülayim, A. (2017). Bedensel engelliler için mutfaklarda hareketli mobilya ve ekipmanlarının tasarlanması. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6(3), 912 – 920.
- [17] TOKİ (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Toplu Konut İdaresi Başkanlığı) proje görselleri. <https://www.toki.gov.tr/proje-gorselleri>
- [18] Neufert, E. & Neufert, P. (2012). Neufert: Architect's data. Blackwell Publishing Ltd.
- [19] Heiss, O., Degenhart, C. & Ebe, J. (2010). Barrier-free design: Principles, planning, examples. Birkhäuser.
- [20] Çınar, H. & Erdem, H. E. (2008). Yaşam hakkı: Tekerlekli sandalye kullanıcılarının konut iç mekân donatı elemanları ve mobilya kullanımı. Politeknik Dergisi, 11(2), 169-174.
- [21] TÜİK. (2020, Haz 4). Türkiye sağlık araştırması 2019. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Turkey-Health-Survey-2019-33661>
- [22] TÜİK. (2022). Engelli ve yaşlı istatistik bülteni. https://www.aile.gov.tr/media/98625/eyhgm_istatistik_bulteni_ocak_2022.pdf

- [23] İç Mimarlar Odası İstanbul Şubesi ve AYDER'in (Alternatif Yaşam Derneği) (2006). Engelsiz Kişisel Yaşam Alanı (oda) ve Mobilya Tasarım Yarışması. <https://v3.arkitera.com/h10413-engelliler-icin-engelsiz-mobilyalar-tasarladi.html>
- [24] Trendir. (2016, May 14). Special Needs Kitchens by Snaidero: Skyline Lab. <https://www.trendir.com/special-needs-kitchens-by-snaidero-skyline-lab/>
- [25] Arkitera. (2011, Ara 15). Mobilya tasarımında en yeni fikirler ödüllendirildi. <https://www.arkitera.com/haber/mobilya-tasariminda-en-yeni-fikirler-odullendirildi/>
- [26] Archdaily. (2019, Tem 10). How to design an accessible kitchen: Adjustable and multifunctional furniture. <https://www.archdaily.com/920447/how-to-design-an-accessible-kitchen-adjustable-and-multifunctional-furniture>
- [27] Çakır Sümer, G. (2015). "Engelsiz Şehir" Kavramı Açısından Malatya. Yönetim ve Ekonomi, 22(1), 139-157.
- [28] Türkyılmaz, E. & İskender, E. (2018). Mimari tasarımda ulaşılabilirlik kavramının tekerlekli sandalye kullanıcıları açısından irdelenmesi. Megaron, 13(2), 297-323.
- [29] Tiyek, R., Eryiğit, B.H. & Baş, E. (2016). Engellilerin erişilebilirlik sorunu ve TSE standartları çerçevesinde bir araştırma. Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12, 225-261.
- [30] Sezen, M. (2007). Fiziksel Engellilerin Rehabilitasyonuna Yönelik Mobilya Tasarım Araştırmaları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

The Analysis of Electron Transfer Mechanism Within Fuel Cell Systems: Electrochemical and Microbial Approaches

İşıl BİLGİÇ^{1*} 

¹Istanbul Okan University, Vocational School, Department of Electric and Energy, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 29/07/2023
Revision: 13/08/2023
Accepted: 12/10/2023

Keywords

Microbial fuel cells
Thiobacillus ferrooxidans
Electron transfer
mechanism

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2023
Düzeltilme: 13/08/2023
Kabul: 12/10/2023

Anahtar Kelimeler

Mikrobiyal yakıt hücreleri
Thiobacillus ferrooxidans
Elektron transfer
mekanizması

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

System in this study generates electricity by utilizing *Thiobacillus ferrooxidans*, an oxidation bacterium, at the cathode, and a mixed culture of bacteria at the anode within the MFC. The research delves into the fuel cell system's performance through electrochemical measurements. Furthermore, the study investigates the porphyrin structure of *Thiobacillus ferrooxidans* and unveils the electron transfer mechanism occurring at the cathode. / Bu çalışmadaki sistem, MFC içindeki katotta bir oksidasyon bakterisi olan *Thiobacillus ferrooxidans*'ı ve anotta karışık bir bakteri kültürünü kullanarak elektrik üretimini sağlamaktadır. Araştırmada elektrokimyasal ölçümler yoluyla yakıt hücresi sisteminin performansı ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, *Thiobacillus ferrooxidans*'ın porfirin yapısı ve katotta meydana gelen elektron transfer mekanizması incelenmiştir.

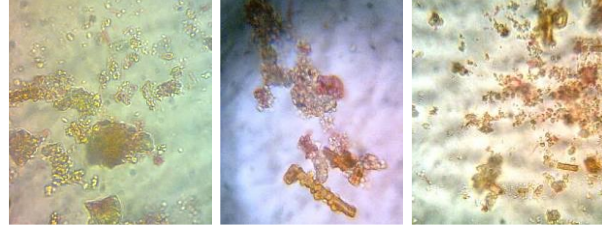


Figure A: Microscope images of the cathode bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* / Şekil A: Katot bakterisi *Thiobacillus ferrooxidans*'ın mikroskop görüntüleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Microbial fuel cells (MFCs) have gained attention as a promising avenue for alternative energy systems, offering a straightforward design and the ability to treat wastewater during energy production, thus sidestepping the use of fossil fuels. / Mikrobiyal yakıt hücreleri (MFC'ler), basit bir tasarım ve enerji üretimi sırasında atık suyu arıtma yeteneği sunarak alternatif enerji sistemleri için umut verici bir yol olarak dikkat çekmiş ve böylece fosil yakıtların kullanımını azaltmaya aday olmuştur.
- This study capitalizes the benefits of MFCs by utilizing *Thiobacillus ferrooxidans*, an oxidation bacterium, at the cathode, and a mixed culture of bacteria at the anode within the MFC. / Bu çalışma, MFC içindeki katotta bir oksidasyon bakterisi olan *Thiobacillus ferrooxidans* ve anotta karışık bir bakteri kültürü kullanarak MFC sisteminin avantajlarından yararlanmaktadır.
- In this study, the effects of different pH values and nutrients on system performance were investigated. / Bu çalışmada farklı pH değerleri ve besin maddelerinin sistem performansına etkileri araştırılmıştır.

Aim (Amaç): In this study, the electron transfer mechanism and system performance of the MFC system using *Thiobacillus ferrooxidans* as the cathode bacteria were examined. / Bu çalışmada katot bakterisi olarak *Thiobacillus ferrooxidans* kullanılan MFC sisteminin elektron transfer mekanizması ve sistem performansı incelenmiştir.

Originality (Özgünlük): The effects of the use of the iron oxidation bacterium *Thiobacillus ferrooxidans* in MFCs have been added to the literature./ Demir oksidasyon bakterisi olan *Thiobacillus ferrooxidans*'ın MFC'lerde kullanımının etkileri literatüre eklenmiştir.

Results (Bulgular): node and cathode pH values, bacteria used in the cathode and anode nutrients are important in terms of the power values to be obtained from the system. / Anot ve katot pH değerleri, katotta kullanılan bakteriler ve anot besin maddesi sistemden elde edilecek güç değerleri açısından önemlidir.

Conclusion (Sonuç): Conditions where the system reaches 0.8 V open circuit potential. Acetate was seen as the most suitable nutrient. / Sistem 0,8 V açık devre potansiyeline ulaşmıştır. En uygun besin maddesinin asetat olduğu görülmüştür.



The Analysis of Electron Transfer Mechanism Within Fuel Cell Systems: Electrochemical and Microbial Approaches

Işıl BİLGİÇ^{1*}

¹Istanbul Okan University, Vocational School, Department of Electric and Energy, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 29/07/2023
Revision: 13/08/2023
Accepted: 12/10/2023

Keywords

Microbial fuel cells
Thiobacillus ferrooxidans
Electron transfer
mechanism

Abstract

Fuel cells are recognized for generating energy through electrochemical reactions while being environmentally friendly, as their only waste product is water. However, for these systems to achieve widespread commercial adoption, it's crucial to reduce the costs associated with catalysts used in the core of the system, known as the membrane-electrode assembly. Microbial fuel cells (MFCs) have gained attention as a promising avenue for alternative energy systems, offering a straightforward design and the ability to treat wastewater during energy production, thus sidestepping the use of fossil fuels. MFCs offer several advantages by employing inorganic molecules instead of traditional catalysts and microorganisms in lieu of enzymes. This study capitalizes on these benefits by utilizing *Thiobacillus ferrooxidans*, an oxidation bacteria, at the cathode, and a mixed culture of bacteria at the anode within the MFC. This approach leads to improved conductivity and overall system performance. The research delves into the fuel cell system's performance through electrochemical measurements. Furthermore, the study investigates the porphyrin structure of *Thiobacillus ferrooxidans* and unveils the electron transfer mechanism occurring at the cathode.

Yakıt Hücreleri Sistemlerinde Elektron Transfer Mekanizmasının Analizi: Elektrokimyasal ve Mikrobiyal Yaklaşım

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2023
Düzelme: 13/08/2023
Kabul: 12/10/2023

Anahtar Kelimeler

Mikrobiyal yakıt hücreleri
Thiobacillus ferrooxidans
Elektron transfer
mekanizması

Öz

Yakıt hücreleri, tek atık ürünü su olduğundan, çevre dostu olmasının yanı sıra elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla enerji üretmesiyle de tanınmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin ticari olarak yaygın şekilde benimsenmesi için, sistemin merkezinde kullanılan, membran-elektrot düzeneği olarak bilinen sistemin katalizör içeriği maliyetlerinin azaltılması çok önemlidir. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MFC'ler), basit bir tasarım ve enerji üretimi sırasında atık suyu arıtma yeteneği sunarak alternatif enerji sistemleri için umut verici bir yol olarak dikkat çekmiştir ve böylece fosil yakıtların kullanımını azaltmaya adaydır. MFC'ler, geleneksel katalizörler yerine inorganik moleküller ve enzimler yerine mikroorganizmalar kullanarak çeşitli avantajlar sunar. Bu çalışma, MFC içindeki katotta bir oksidasyon bakterisi olan *Thiobacillus ferrooxidans*'ı ve anotta karışık bir bakteri kültürünü kullanarak bu faydalardan yararlanır. Bu yaklaşım iletkenliğin ve genel sistem performansının iyileştirilmesine yol açar. Araştırma, elektrokimyasal ölçümler yoluyla yakıt hücreleri sisteminin performansını araştırmıştır. Ayrıca bu çalışmada, *Thiobacillus ferrooxidans*'ın porfirin yapısı ve katotta meydana gelen elektron transfer mekanizması incelenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Fuel cells are capable of transforming chemical energy into electrical energy as long as a constant supply of fuel and oxidants is maintained. The efficiency of fuel cell systems is notably higher, nearly twice, compared to internal combustion engines, due to the direct occurrence of oxidation

and reduction reactions on the electrode surface. Microbiological fuel cells exploit the microbial catalytic properties of organic compounds present in carbohydrate-rich waste materials. These systems harness the significant energy stored in carbohydrates, which are abundantly found in various sources including agricultural waste biomass, urban refuse, and crops like corn. The

conversion of carbohydrate energy into usable forms can involve processes like ethanol and hydrogen conversion. However, these methods tend to be complex and involve multiple steps, often entailing technical and economic challenges.

There is also an alternative method for directly converting sugar into electrical energy. Fuel cells using transition metals as catalysts cannot be used to generate electricity from carbohydrates. The most appropriate approach is to use microbiological fuel cells catalyzed by sugar oxidation during the life processes of microorganisms in the system or during fermentation to generate electricity directly from carbohydrates. Bacteria oxidize the organic matter at the anode and a current is obtained while electrons are sent to the cathode with the help of an external circuit. Interestingly, MFCs are seen as promising systems because they provide both the wastewater treatment process and electricity generation.

They can also be used as biosensors in the measurement of lactate, fructose and the analysis and determination of BOD (Biochemical Oxygen Demand). MFCs are also an alternative for use in remote areas such as the ocean floor where batteries cannot be used. Intelligent machines, called gastrobots, that can generate their own working power using organic materials have also been developed.

Microbial fuel cells (MFCs) are categorized into two groups based on their electron transport mechanism from bacteria to the electrode. In MFC systems employing mediators, electron carriers or mediators are introduced to facilitate electron transfer. However, most mediators are toxic substances and need to be used in high concentrations, rendering their application challenging for large-scale systems. The utilization of mediator-free MFCs holds promise for generating electricity from organic wastewater.

Metal-reducing bacteria, such as *Shewanella*, *Rhodospirillum rubrum*, *Geobacteraceae*, and *Clostridium butyricum*, offer an alternative approach. These fermentative bacterial species can function without mediators. Metal-reducing bacteria are thought to directly transfer electrons to the anode, utilizing electrochemically active redox enzymes within their outer membrane.

The electrical output from MFCs typically varies based on factors like the initial bacterial inoculation, the type of substrate used, and the reactor design. The power generated ranges between 1 and 3600 mW/m². In the microbiological cathode chamber, ferrous sulfate present in the nutrient water acts as an electron acceptor. This chamber's solution remains clean due to constant renewal by microorganisms.

One of the metal oxidation bacteria used in these systems is *Thiobacillus ferrooxidans*. In a study in which graphite was used as an electrode and *Thiobacillus ferrooxidans* as redox bacteria at the cathode, it was observed that the open circuit potential increased up to 0.74 V. At a current density of 23 A/m², the power density increased up to 6.61 W/m² [1]. In another study by Heijne et.al. (2007) in which *Thiobacillus ferrooxidans* was used in the MFC system, a power density of 1.2 W/m² was obtained while the current density was 4.4 A/m² [2]. This result is 38% higher than the power value obtained by Heijne et.al. in another study in which they did not use the iron oxidation mechanism [3].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIALS AND METHOD)

2.1 *Thiobacillus Ferrooxidans* Bacteria (*Thiobacillus Ferrooxidans* Bakterisi)

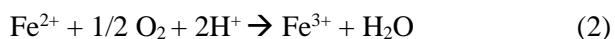
Thiobacillus ferrooxidans is a type of bacteria characterized by its gram-negative nature and rod-shaped morphology. It thrives in inorganic environments typical of mines and has the unique ability to utilize carbon dioxide from the air, making it autotrophic. While some research suggests the presence of heterotrophic growth, such findings are considered unreliable. Instances of *Acidiphilium* species, which are heterotrophic, appearing in *Thiobacillus ferrooxidans* cultures are attributed to cultivation errors. A study managed to cultivate a mixotrophic strain in an iron and glucose medium, although organic compounds generally impede its growth. In studies involving *Thiobacillus ferrooxidans* strains, carbon dioxide, the primary carbon source, can occasionally be substituted with formic acid. Yet, it's important to maintain low formate concentrations when utilizing chemostats. Notably, one strain, ATCC 21834, exhibited enhanced performance when selectively consuming formic acid [4].

Thiobacillus ferrooxidans possesses five distinctive attributes. Initially, it exhibits chemolithotrophy, where, in the presence of atmospheric oxygen and carbon dioxide, it harnesses energy and sustains its cellular growth through the utilization of reduced inorganic sulfur and Fe²⁺. This mechanism can be represented as follows:



Another characteristic feature is that it is autotrophic. *Thiobacillus ferrooxidans* use CO₂ as a cellular carbon source. Nutrients such as N and P and trace elements such as K, Mg, Na, Ca, and CO are the elements needed for cell development and synthesis. *Thiobacillus ferrooxidans* is an aerobic bacterium. It uses oxygen as an electron acceptor. Since they live at temperatures between 20-40°C, they have a mesophilic structure. It also has an acidophilic nature. They live at pH between 1-4.5. But the optimum pH is between 1.5-2.5. They cannot live below pH 1.0 and above 4.5 [5].

Thiobacillus ferrooxidans is ubiquitous. It can be easily isolated from soil samples collected around ore deposits or from acid drainage sites, often made for coal tailings or mine heap [6]. *Thiobacillus* are colorless microorganisms. It enables these microorganisms to metabolize metal ions such as iron oxidase, Fe²⁺:



Apart from its autotrophic nature, this bacterium possesses the capability to capture atmospheric nitrogen. Nitrogen fixation genes were identified in all 15 examined species of *Thiobacillus ferrooxidans*, indicating a probable presence of diazotrophy as a common trait among these bacteria [4]. However, the existing information regarding *Thiobacillus ferrooxidans*' nitrogen needs is contradictory. While one strain of this bacterium has been observed to sense free atmospheric nitrogen, other research has consistently demonstrated that ammonium salts are necessary for its growth. On the other hand, it is obvious that the pH of the environment being too acidic will cause the ammonia in the air to dissolve in the environment,

and this may be due to the fact that almost every strain can grow in nitrogen-free media for at least a few generations. Tsuchiya showed that when a strain of *Thiobacillus ferrooxidans* produced nitrogen-fixing, acidophilic, heterotrophic, *Beijerinckia laticogenes* together, the nitrogen requirement of *Thiobacillus ferrooxidans* could be met by *Beijerinckia laticogenes* symbiotically with nitrogen in the air [5].

Energy is generated through the process of oxidizing iron or iron ions, as well as converting reduced sulfur compounds into sulfuric acid. These bacteria thrive in acidic conditions, with an optimal pH range of 1.5-2.5. They flourish best in aerobic environments, utilizing oxygen as an electron acceptor. In cases where oxygen is absent and either formate or reduced sulfur compounds act as electron donors, iron ions serve as electron acceptors. *Thiobacillus ferrooxidans* has the capacity to oxidize various other compounds apart from iron and sulfur. Within the species, there are three strains, including strain ATCC 23270, which are cultivated in a basic salt medium, in the presence of both CO₂ and O₂, and under conditions where H₂ is the sole energy source. Additionally, scientific literature highlights instances where *Thiobacillus ferrooxidans* grows by directly oxidizing UO₂ in an iron medium, a process facilitated by a molybdenum oxidation enzyme.

A detailed representation of rusticyanin in *Thiobacillus ferrooxidans* is given in Figure 1. As can be seen in the color scale in the figure, the parts of the strip shown in blue are the amino ends of the proteins and the 5' ends of the nucleic acids. The carboxy ends of proteins and the 3' ends of nucleic acids are red. The extremes between these two values are colored according to their degrees. The round structure in the figure shows the copper in the rusticyanin. In the study Barrett et al., they modeled the crystal structure of rusticyanin and blue copper in the structure of *Thiobacillus ferrooxidans*, which has a high redox potential. As a result of their quantum chemical modeling and calculations, they found the redox potential of Cu(II) to be 400 mV. This value is higher than the redox potential of rusticyanin [7].

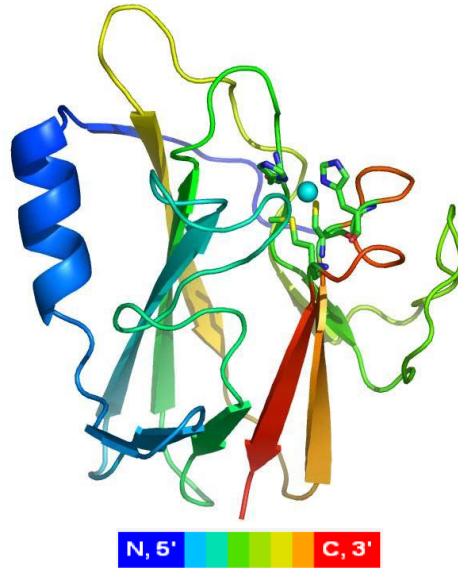


Figure 1. Structure of rusticyanin in *Thiobacillus ferrooxidans* (*Thiobacillus ferrooxidans*'taki rustisiyanin yapısı) [8]

The majority of *Thiobacillus ferrooxidans* isolates exhibit minimal nutritional requirements. Adequate aeration is enough to facilitate the growth of iron pyrite in acidic water. Pyrite serves as an energy source and supplies crucial trace elements, while air contributes carbon, nitrogen, and oxygen. The acidic solution forms the growth medium. The

biological structure modeling of *rusticyanin* in *Thiobacillus ferrooxidans* is depicted in Figure 1. In the figure, atoms are shown in the form of sticks and in color. Carbon atoms are shown in gray, oxygen atoms in red, nitrogen atoms in blue, and sulfur atoms in yellow.

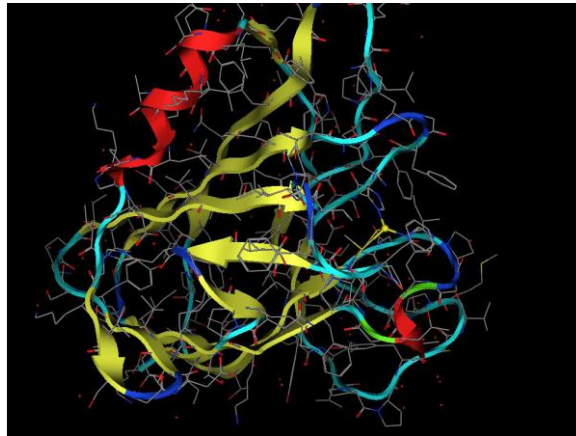


Figure 2. Biological structure modeling of rusticyanin in *Thiobacillus ferrooxidans* (*Thiobacillus ferrooxidans*'taki rustisiyanin biyolojik yapı modellemesi) [7]

In addition to its distinctive physiological traits, *Thiobacillus ferrooxidans* boasts other attributes that make it well-suited for application in bio-mining. Notably, it exhibits inherent resilience to elevated concentrations of metallic and other ions. For instance, research indicates its ability to thrive in environments rich in Zn^{2+} (120 g/l), Ni^{2+} (72 g/l),

Co^{2+} (30 g/l), Cu^{2+} (55 g/l), U308 (12 g/l), and Fe^{2+} (160 g/l). Another remarkable feature is its exceptional adaptability when confronted with unfavorable growth conditions. Previously susceptible strains showcased the organism's capacity to adapt to environments with high levels of arsenic and copper, even below the optimal pH

value. Abergel et al. (2003) explored the electron transfer mechanism between rusticyanin and cytochrome-c in their study, as illustrated in Figure 2 [9].

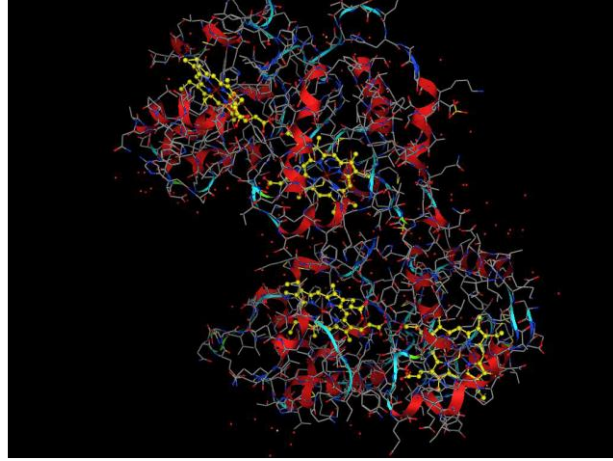


Figure 3. Thiobacillus ferrooxidans c(4)-cytochrome structure (a) (Thiobacillus ferrooxidans c(4)-sitokrom yapısı)

The adaptation mechanism is probably by the occurrence of advantageous mutations under selected conditions. Schrader and Holmes (1988) suggested that there may be other mechanisms that contribute to the rapid adaptation of bacteria in harsh environments [10]. The c(4)-cytochrome structure of *Thiobacillus ferrooxidans* is given in Figure 3 and Figure 4. There is an iron atom (dark red) in the center of this structure called the

porphyrin ring. Nitrogen atoms can be seen bound to the iron atom (blue). The nitrogen atoms at the ends combined with the carbon atoms (yellow) to form the c(4)-cytochrome structure. We see that oxygen atoms (red) are attached to the carbon atoms at the ends.

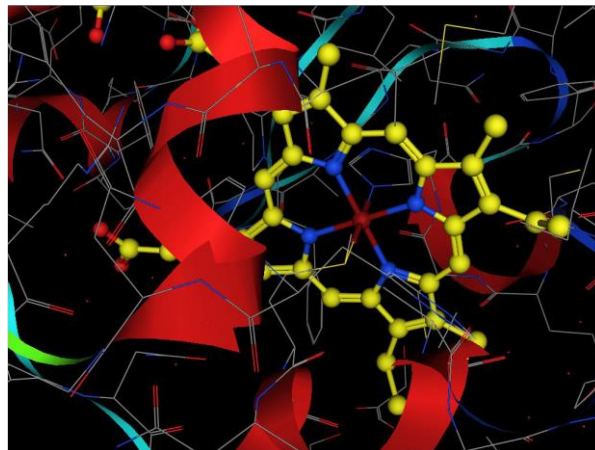


Figure 4. Thiobacillus ferrooxidans c(4)-cytochrome structure (b) (Thiobacillus ferrooxidans c(4)-sitokrom yapısı)

All *Thiobacillus ferrooxidans* isolates are genetically similar [4]. Harrison, (1984) conducted a systematic study on a large number of *Thiobacillus ferrooxidans* strains and found that the

G+C content of their DNA was in the range of 55-65 mol% [11].

2.2 MEA (Membrane Electrode Assembly) Preparation (MEA Hazırlama)

The prepared catalysts were turned into a membrane electrode assembly (MEA) to test their performance in the fuel cell test system. Gas diffusion layers coated with thin film catalyst and used as anode and cathode were cut into squares of 5 cm² and 25 cm².

The selected proton exchange membrane, Nafion 115, was activated by immersing it in a 0.1 M

H₂SO₄ solution for 12 hours. Subsequently, it was rinsed with deionized water and dried. The anode and cathode were positioned on opposite sides of the Nafion 115 membrane. The resulting membrane-electrode layers were then transformed into a membrane-electrode assembly (MEA) through a hot pressing process. Figure 5 illustrates the produced MEA.



Figure 5. Membrane Electrode Assembly (Membran Elektrot Düzeneği)

A 5% nafion solution was applied as binder to the cut catalyst layers. The amount of binder used varies according to the thickness of the prepared catalyst films. This value was found as 3 µl of 5% nafion solution for the thickness used. If the binder is not optimized, the amount of binder affects the stability of the catalyst and the limited current density.

The membrane-electrode assembly (MEA) was subjected to a temperature of 117°C within the hot press. Subsequently, a pressure of 20 bars was applied for a duration of 5 minutes. Afterward, the temperature was discontinued, and the MEA was allowed to cool while maintaining the applied pressure. The hot press employed for pressing the MEA is depicted in Figure 6.



Figure 6. Hot Press Device (Sıcak Pres Cihazı)

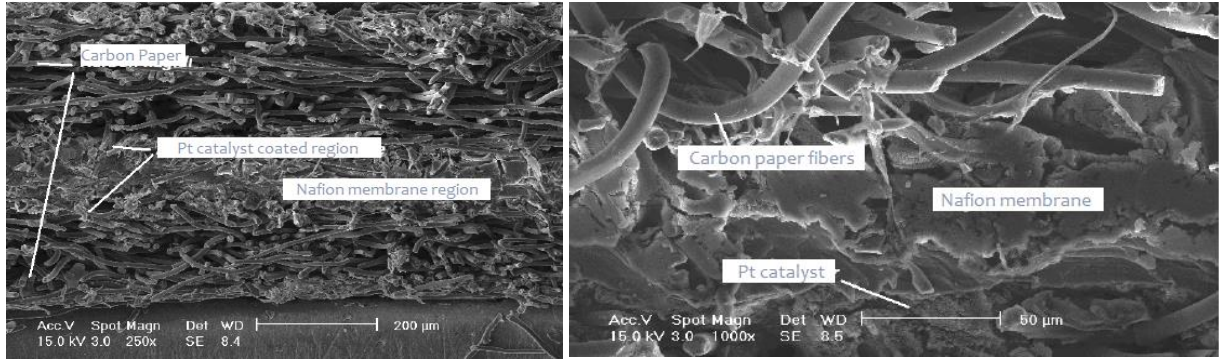


Figure 7. SEM cross-section images of the membrane electrode assembly (a), (b) (Membran elektrot düzeneğinin SEM kesit görüntüleri)

The cross-sectional images of the obtained membrane electrode assembly using SEM are given in Figure 7. The regions formed by the membrane, catalyst, and carbon paper are clearly visible in the images.

2.3. Iron Analysis (Demir Analizi)

The reaction between 5-sulfosalicylic acid (SSA) and Fe^{2+} ions is recognized to yield a red-colored compound, while the interaction with iron ions in an acidic environment results in a yellow-colored compound. Lurie (1984) introduced a relatively

straightforward technique using SSA to determine Fe^{3+} and total iron concentrations [12].

This approach involves distinct steps for analyzing each form of iron. The procedure outlined by Lurie (1984) is specifically tailored for the analysis of iron in standard wastewater samples [12].

$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ was used for calibration. Calibration was performed for the concentration range of 1-20 mg/L Fe^{+2} . 0.25 from stock $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ solution containing 200 mg/L Fe^{+2} ; 0.5; 2; 4; 6; 9 mL was taken and placed in balloon jugs. Each vessel was filled with 97 mL of distilled water.

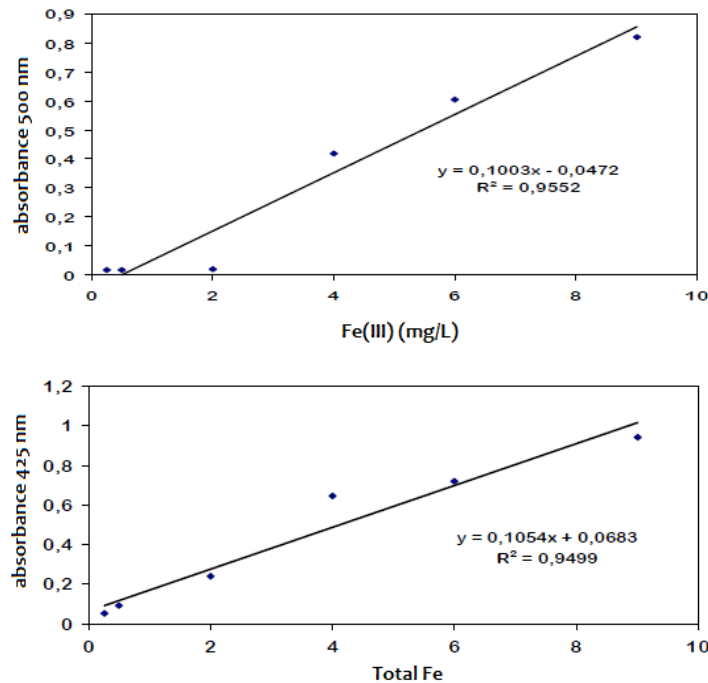


Figure 8. Fe^{+3} and Total Iron Calibration Curves (Fe^{+3} ve Toplam Demir Kalibrasyon Eğrileri)

Then, 3 mL of 10% SSA was added to these containers and mixed. It was read against the blank prepared by adding distilled water and all reagents

in a GBC brand UV-Spectrophotometer set to 500 nm.

To determine the total iron content, 3 mL of ammonia was introduced into the solutions containing added SSA, and the measurement was taken. The readings were then compared against a blank sample created by combining distilled water and all the necessary reagents. A UV-Spectrophotometer set at 425 nm was used for these measurements. The collected data points were plotted, and calibration curves were generated. The calibration curves for Fe^{+3} and total iron are visually presented in Figure 8.

2.4. Preparation of Polyurethane Foam (Poliüretan Köpük Hazırlama)

For the preparation of polyurethane foam, 83.3 g of Hypol 2002 was taken and 100 mL of distilled water was added and mixed rapidly until foam formed. It was then left to dry for 24 hours at 60°C. The foam was divided into small pieces, kept in H_2SO_4 , and after being sulfonated, it was made ready to be added to the iron oxidation.

2.5. MFC Application (MFC Uygulaması)

The aim of this study is to measure the usage performance of the redox couple $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ as a cathodic mediator. In addition, system performance was measured by using Pt coated with sputter technique in much lower amounts ($22 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) as the anode and cathode catalyst material. Three main reasons for using $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ as a redox couple are: it can react quickly at carbon electrodes, its standard potential is high (at low pH, equal concentrations of Fe^{+3} and Fe^{+2} , +0.77V, etc.). NHE) and (+850)-(+950mV) Fe^{+2} can be biologically oxidized to Fe^{+3} by the use of oxygen as an electron acceptor.

In the system, carbon paper coated with Pt at $22 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ charge was used as electrodes on both sides. Mixed culture anaerobic bacteria were used as anode bacteria at the anode. *Thiobacillus ferrooxidans* was used as the iron-oxidizing bacteria at the cathode. The anode and cathode are separated from each other by the ion exchanger Nafion membrane. During the experiments, Fe^{+3} reduction will take place in the MFC cathode, while Fe^{+2} oxidation will take place in the cathode reactor at the same time.

The exterior enclosure of the microbial fuel cell is constructed from plexiglass material. The fuel cell itself comprises an internal volume of 100.54 cm^3 , which is evenly partitioned into two sections – the anode and the cathode. Upon inserting the membrane electrode assembly (MEA) between these anode and cathode sections, Teflon gaskets were employed for sealing, and the two segments were securely joined using bolts.

In the iron oxidation reactor of the applied design, the conversion of Fe^{+2} ions to Fe^{+3} takes place. Continuous circulation takes place in the cathode chamber. The oxidized iron ions in the reactor come to the cathode compartment of the fuel cell, where they are converted back to Fe^{+2} . This reaction takes place via electrons that pass from the anode to the cathode via the external circuit. A reactor was used for the cathode bacteria in the system. The iron oxidation reaction will take place in this chamber by forming a biofilm on the sulfonated polymer particles inside the reactor.

The electrochemical measurements were carried out using a CHI Model 800B potentiostat device. Throughout the experimentation, the pH of the system, open circuit potential, and cyclic voltammetry plots were regularly monitored. The anode compartment of the setup contained 15 mL of thoroughly mixed culture anaerobic microorganisms. To examine the impact of various nutrients on the cell's electrochemical performance, sodium acetate, glucose, and sucrose were employed as anode feed sources. A nutritional supplement was introduced into the anode compartment at a rate of 1 g/L per day. Additionally, every 4 days, 1 mL of the nutrient solution was added to the anode (4.31 g/L NH_4Cl , 5.39 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 4.31 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, and 54 mg/L FeCl_3) [3].

Thiobacillus ferrooxidans was used at the cathode. The cathode's first solution was prepared with iron (II) sulfate. Afterward, feeding was carried out at regular intervals. *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria used were isolated from Murgul Copper Enterprises drainage water. 9K medium was chosen as the medium for bacteria. The composition of the 9K medium; 3 g/L $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$, 0.5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.5 g/L KH_2PO_4 , 0.1 g/L KCl, 0.01 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Drainage water was seeded in 9K medium at a rate of 10% and its pH was adjusted to 2.

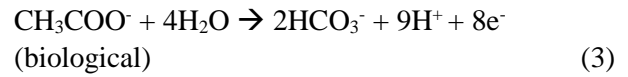
The solution prepared for activation was left to incubate in a shaker with an incubator at 200 rpm. Fe^{2+} concentration and color change were monitored daily. The samples changed from yellow to red-brown after 4 days.

Thiobacillus ferrooxidans bacteria standard nutrients (0.4 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.4 g/L KH_2PO_4 , and 0.4 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ for pH 2 in 33 g/L $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ medium before adding to the MFC system grown by adding [2]. The solution containing the active bacteria was added to the reactor containing polyurethane foam to form a biofilm surface. The solution was circulated continuously in the reactor by giving air to the system. Meanwhile, the conversion of Fe^{+2} ions to Fe^{+3} ions was controlled by making iron analyses. After the conversion of iron ions was completed, the solution containing Fe^{+3} ions in the reactor was transferred to the cathode compartment of MFC. The reduction reaction at the cathode was again controlled by the iron analysis. At this time, the air was supplied to the system continuously. Again, every four days, 1 mL of nutrient was added to the cathode compartment.

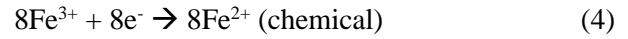
3. ANALYSIS (ANALİZ)

As seen in the MFC diagram presented in Figure 9.; While acetate decomposes into CO_2 and H^+ in the anode compartment, the resulting electrons are transferred to the cathode with the help of an external circuit. At the cathode, iron ions that are oxidized in the reactor from Fe^{+2} to Fe^{+3} are reduced back to Fe^{+2} by taking electrons from the anode on the cathode electrode. In the MFC system, where *Thiobacillus ferrooxidans* is used as the cathode bacteria, the anode and cathode reactions take place as follows:

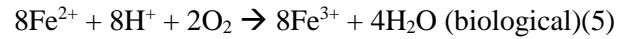
Anode:



Cathode:



Reactor:



Net reaction:

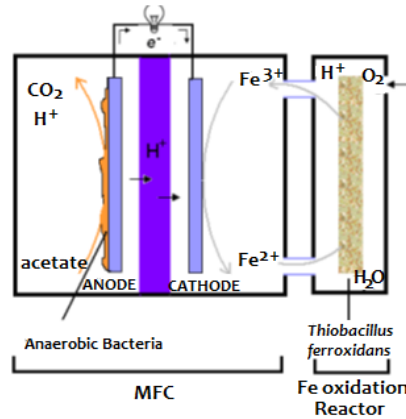
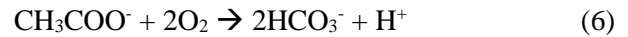


Figure 9. Schematic representation of the MFC system experimental setup (MFC sistemi deney kurulumunun şematik gösterimi)

First, biofilm formation of *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria was performed on sulfonated polyurethane foam pieces in the cathode reactor. For this, bacterial culture and standard nutrients were added into 500 mL of purified water containing 6g/L $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. A mechanism was set up to circulate the obtained solution in the cathode reactor. Circulation was provided by a peristaltic pump. Meanwhile, the air was sent to the system by

using a T hose at the reactor inlet. This setup was run for one week.

In Figure 10. light microscope images of *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria used in the cathode compartment of MFC are presented. The bacteria sample was taken from the biofilm layers formed in the reactor and on the cathode electrode.

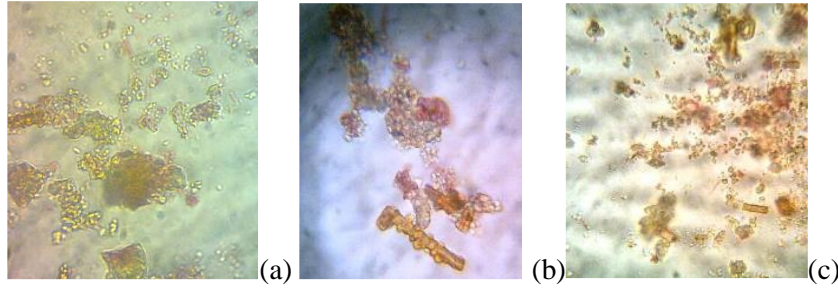


Figure 10. Microscope images of the cathode bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* (a, b, c)

(Katot bakterisi *Thiobacillus ferrooxidans*'ın mikroskop görüntüleri)

In these images, the capsule structure of the bacterium is clearly seen. In the photo coded (a), there are images of the samples taken from the reactor. In addition, in the photo coded (b) and (c), there are capsules attached to the carbon paper fiber used as the electrode material. The fibrous structure

of the carbon paper also increased the surface area where the bacterial biofilm was formed.

SEM images of mixed culture anaerobic bacteria used in the anode chamber of MFC, taken from different distances, are presented in Figure 11.

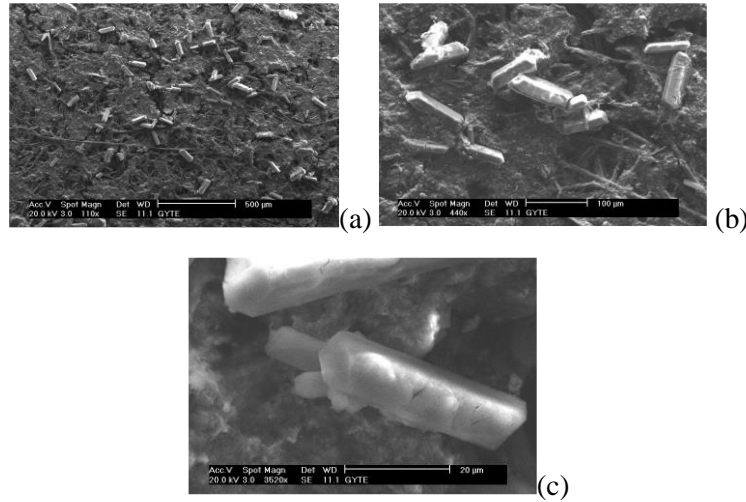


Figure 11. SEM images of mixed culture anaerobic bacteria used as anode bacteria (a (110x), b (440x), c (3520x)) (Anot bakterisi olarak kullanılan karışık kültürlü anaerobik bakterilerin SEM görüntüleri)

The bacteria sample was taken from the biofilm formed on the anode electrode. When we look at the images, it is seen that the microorganism is homogeneously distributed on the anode electrode. The capsule size of the microorganisms is 30 µm on average. After the biofilm formation was achieved,

the reactor was connected to the cathode part of the fuel cell, and circulation between the cathode-reactor was ensured. Air continued to be supplied to the system. Meanwhile, biofilm formation has already taken place in the anode chamber under anaerobic conditions.

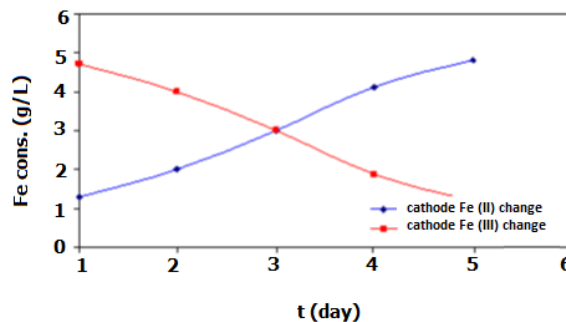
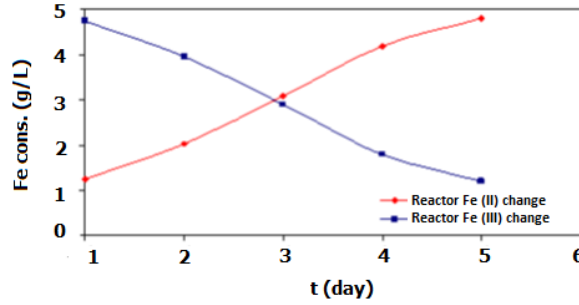


Figure 12. Fe^{+3} and Fe^{+2} concentration (g/L) change over time in the cathode chamber(Katot bölgesinde zamanla Fe^{+3} ve Fe^{+2} konsantrasyonu (g/L) değişimi)**Figure 13.** Variation of Fe^{+2} and Fe^{+3} concentration (g/L) in the reactor over time (Reaktördeki Fe^{+2} ve Fe^{+3} konsantrasyonunun (g/L) zaman içindeki değişimi)

The graphs are given in Figure 12. and Figure 13. show the variation of Fe^{+2} and Fe^{+3} concentrations in the reactor and cathode. As can be seen in Figure 6.7, Fe^{+2} concentration increased while Fe^{+3} concentration decreased at the cathode. Our initial Fe^{+3} concentration decreased from 4.8 g/L to 1.2 g/L within 6 days. Figure 6.7 Fe^{+3} and Fe^{+2} concentration (g/L) change over time in the cathode chamber As can be seen from the graph, Fe^{+2} , and Fe^{+3} concentrations reached the same values as a result of the reduction reaction within 86 hours. This value is 3 g/L. At the end of the 5th day, the reduction process was completely realized and the Fe^{+3} concentration was reduced to a minimum. Fe^{+2} concentration has taken its maximum value and this value is 4 g/L.

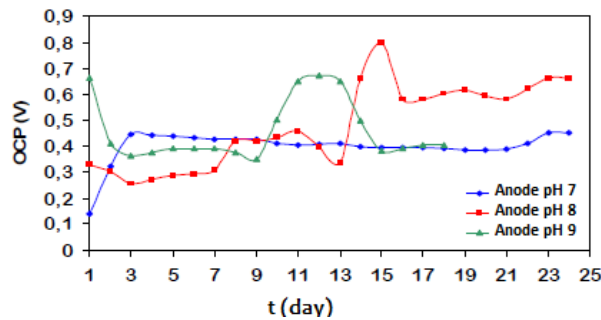
Fe^{+2} and Fe^{+3} concentration distribution in the cathode and reactor compartment is seen similarly. However, in the reactor part of the system, the oxidation process takes place. As seen in Figure 13., while the Fe^{+3} concentration increased with the oxidation process, the Fe^{+2} concentration decreased over time. The results obtained according to the

calibration curve prepared give the oxidation efficiency of *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria.

Change of Fe^{+2} and Fe^{+3} concentration (g/L) in the reactor with respect to time Nemati and Webb, (1999) stated in a study on biological and chemical oxidation of iron that the oxidation efficiency was maximum at a concentration of 20 g/m³[13].

The open circuit potential increases in direct proportion to the activity of bacteria. Therefore, before starting the experiments, the open circuit potential was expected to reach a certain value within a certain period of time, according to pH. These measurements are shown in the graphs below.

During the electrochemical measurements made in the fuel cell, different pH values were investigated. In Figure 14., the time graph of the open circuit potentials measured during the pH change experiments in the system is given. For the cathode, open circuit potential values and CV graphs were taken according to the pH values of 1.5, 2, and 2.5, and the results were compared. This value, which was 0.14 V at the beginning, increased to 0.8 V.

**Figure 14.** Cell open-circuit potential curve with respect to time (Zamana göre hücre açık devre potansiyeli eğrisi)

As seen in the system open circuit potentials at different pH values for the anode and cathode presented in Table 1., the system reached the highest open circuit potential (0.8 V) at anode pH 8 and

cathode pH 2. For this reason, the next performance measurements were made under these conditions. The graphical representation of the table values is presented in Figure 15.

Table 1. System open circuit potentials at different pH values for anode and cathode (Anot ve katot için farklı pH değerlerinde sistem açık devre potansiyelleri)

	Cathode pH	OCP(V)
Anode pH 7	1.5	0.444
	2	0.409
	2.5	0.451
Anode pH 8	1.5	0.256
	2	0.800
	2.5	0.615
Anode pH 9	1.5	0.664
	2	0.391
	2.5	0.652

In addition to this, three different nutrients were used at the anode in the system. These nutrients are sucrose, glucose, and acetate. In Figure 15., open

circuit potential measurement values are given by using sucrose, glucose and acetate as nutrients at the anode, under conditions of cathode pH of 1.5.

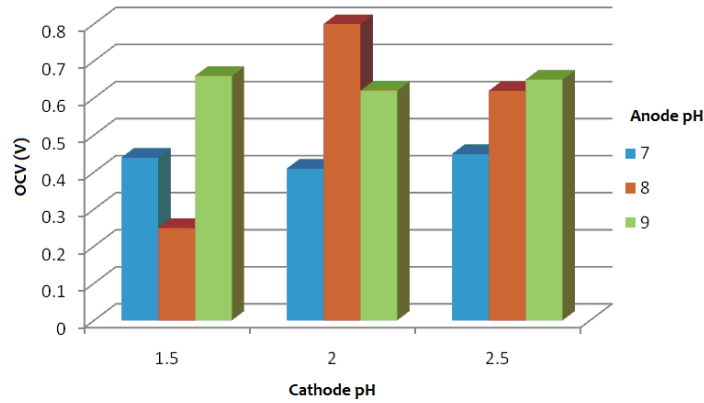
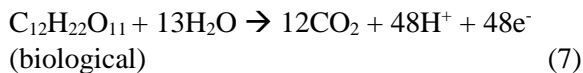


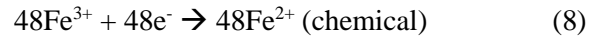
Figure 15. System open circuit potentials at different pH values for anode and cathode (Anot ve katot için farklı pH değerlerinde sistem açık devre potansiyelleri)

As seen in Figure 16, when sucrose was used as the anode nutrient, the open circuit potential, which was initially 0.14 V, increased to 0.45 V at the end of the 3rd day. At the end of the 8th day, it was fixed at 0.42 V. In the experiments using glucose, the open circuit potential, which started at 0.42 V, remained the same. In the experiments using acetate, the initial open circuit potential, which was 0.4 V, started to increase on the 6th day and was fixed at 0.45 V at the end of the 8th day. When sucrose is used as the anode nutrient, the reactions are thought to occur as follows:

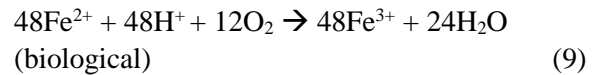
Anode:



Cathode:



Reactor:

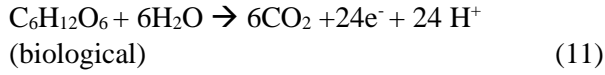


Net reaction:

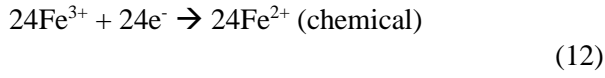


When glucose is used as the anode nutrient, the reactions are:

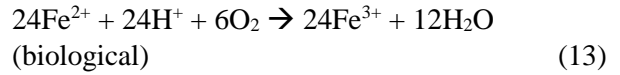
Anode:



Cathode:



Reactor:



Net reaction:

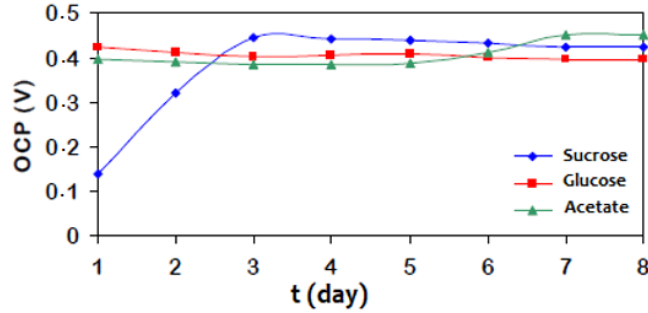
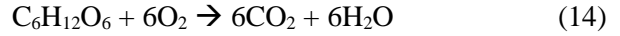


Figure 16. Change in open circuit potential in the use of different nutrients for anode bacteria when the cathode pH value is 1.5 (Katot pH değeri 1,5 olduğunda anot bakterileri için farklı besin maddelerinin kullanımında açık devre potansiyelindeki değişim)

In conditions where the cathode pH value is 2, the open circuit potential variation for different nutrients is given in Figure 16. When sucrose was used as a nutrient, the open circuit potential, which had an initial value of 0.32 V, first decreased and

became 0.3 V. Then it increased and reached 0.42 V at the end of the 8th day. When glucose was used as a nutrient, the initial value of 0.42 V decreased to 0.35 V at the end of the 5th day.

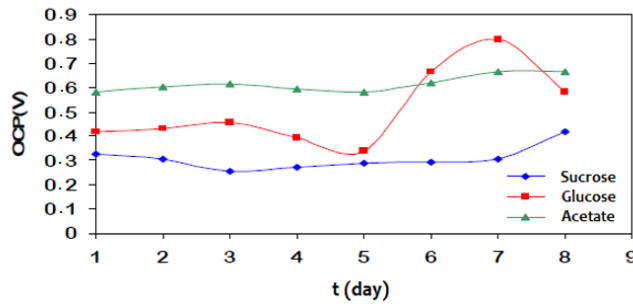


Figure 17. Open circuit potential change in the use of different nutrients for the anode bacteria when the cathode pH value is 2 (Katot pH değeri 2 olduğunda anot bakterileri için farklı besin maddelerinin kullanımında açık devre potansiyeli değişimi)

However, although it increased to 0.8 V at the end of the 7th day, it decreased again and reached 0.6 V at the end of the 8th day. In experiments using acetate, the open circuit potential, which was 0.59 V, reached 0.6 V at the end of the 5th day and 0.7 V at the end of the 8th day. When glucose was used as a nutrient, the system reached its maximum open circuit potential, but could not stay at this value for long. The curve with the most stable and highest value was obtained during the use of acetate.

In Figure 17., open circuit potential measurements made using different nutrients when the cathode pH

value is 2.5 are given. The initial open circuit potential, which was 0.65 V under the conditions of using acetate as the anode nutrient, decreased to 0.4 V at the end of the 3rd day. This value was fixed at 0.42 V at the end of the 8th day.

In the use of glucose; The initial open circuit potential, which was 0.4 V, decreased to 0.38 V at the end of the 3rd day, then increased to 0.67 V at the end of the 5th day and stabilized at this value. When sucrose was used as the anode nutrient, the initial open circuit potential value, which was 0.67

V, decreased to 0.43 V until the 2nd day and stabilized at 0.4 V at the end of the 6th day.

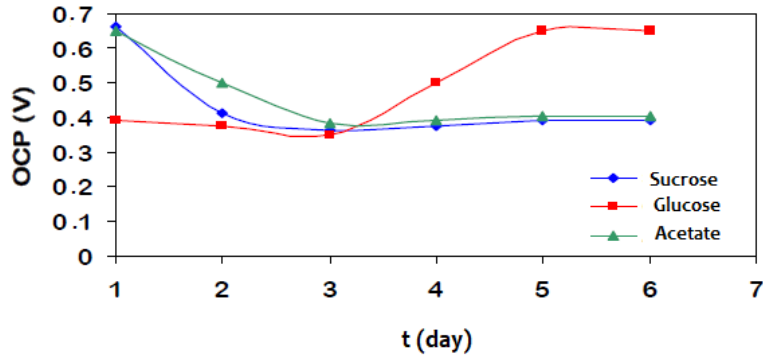


Figure 18. Change of open circuit potential in the use of different nutrients for anode bacteria when the cathode pH value is 2.5 (Katot pH değeri 2,5 olduğunda anot bakterileri için farklı besin maddelerinin kullanımında açık devre potansiyelinin değişimi)

The cyclic voltammetry graph in Figure 18. gives the electrochemical activity of the MFC in the initial state. As can be understood from here, no reaction took place in the system in the first case. The current

density value observed during these experiments reached up to 1.3 mA/cm². In the graphs obtained after one week, the peaks of the reactions can be clearly seen.

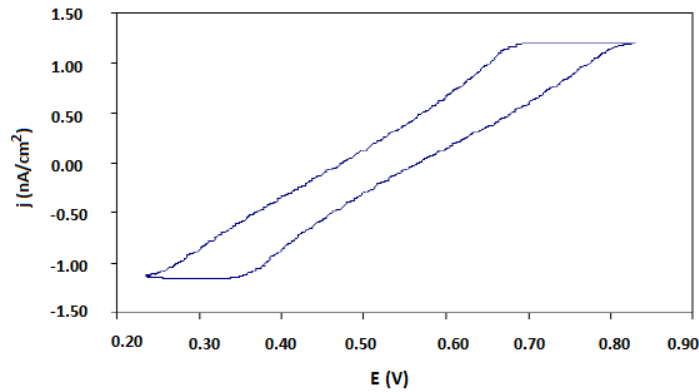


Figure 19. Initial state cyclic voltammetry graph of MFC (MFC'nin başlangıç durumu döngüsel voltametri grafiği)

When the cyclic voltammetry graphs in Figures 20. and 21. are examined, it is possible to have information about the reactions occurring in the

system. Both figures show a peak of 0.35 V. This peak indicates the potential occurrence value of the reactions at the anode.

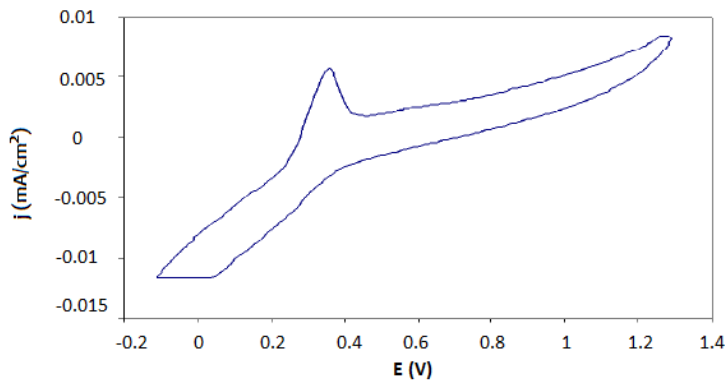


Figure 20. Cyclic voltammetry graph obtained in the system under conditions of Anode: pH 8, nutrient acetate, Cathode: pH 2 (Sistemde Anot: pH 8, besin asetat, Katot: pH 2 koşullarında elde edilen döngüsel voltametri grafiği)

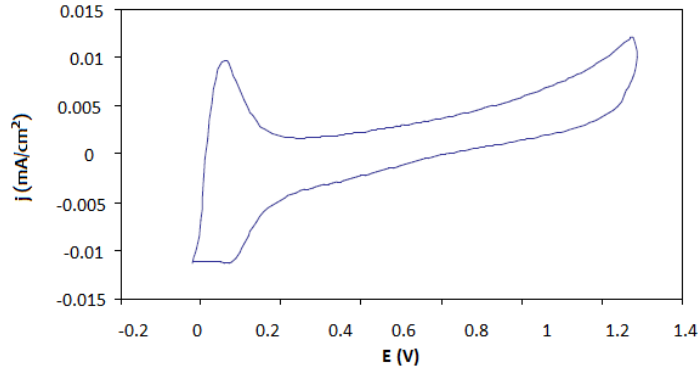


Figure 21. Anode: pH 8, nutrient acetate, Cathode: pH 2, the cyclic voltammetry graph obtained in the system (after 30 days) (Anot: pH 8, besin asetatı, Katot: pH 2, sistemde elde edilen döngüsel voltametri grafiği (30 gün sonra))

In Figure 22., two different cyclic voltammetry graphs using acetate and glucose as anode nutrients are combined. Here, an adsorption peak occurred at the same potential value (0.4 V) in both nutrients.

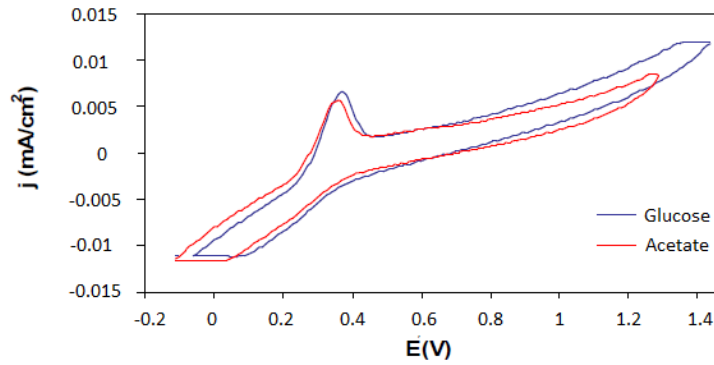


Figure 22. Cyclic voltammetry curves obtained in the system under conditions of Anode: pH 8, nutrient acetate and glucose, Cathode: pH 2 (Sistemde Anot: pH 8, besin asetat ve glikoz, Katot: pH 2 koşulları altında elde edilen döngüsel voltametri eğrileri)

According to the cyclic voltammetry graph in Figure 22., the adsorption peaks are between 0.2 and 0.5 V. The reduction peaks range from 0.2 to 0.7 V. It can be seen from the graph that the double layer region is in the range of 0.05 to 0.3 V. This graph is in agreement with the standard fuel cell cyclic voltammetry graph using a Pt catalyst.

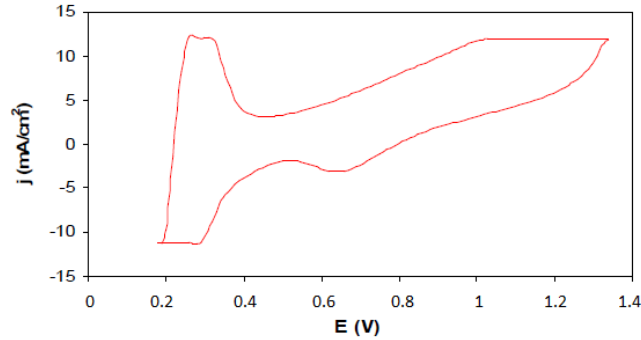


Figure 23. Cyclic voltammetry plot of MFC at system standard conditions (after 40 days) (Sistem standart koşullarında MFC'nin döngüsel voltmetri grafiği (40 gün sonra))

If we compare Figures 21. and 23., it is seen that the current density obtained under the system standard conditions is considerably higher than the initial current density value. The current density value of 15 mA/cm^2 was reached under the conditions of cell anode pH 8 and nutrient acetate.

The graph in Figure 21 was obtained at the end of the 30th day. The graph in Figure 23. is the cyclic voltammetry graph obtained at the end of the 40th day. These experiments, which were carried out with an interval of 10 days, showed that the system reached high performances at the end of the 40th day. No peak is seen in the initial cyclic voltammetry graph given in Figure 19. On the other

hand, a peak with a potential value of 0.7 V is seen in the graph in Figure 23. This is the potential value at which the iron oxidation reaction takes place.

In Figure 24., polarization curves obtained at different cathode pH values are given in the case where the anode pH value is 8 and acetate is used as the nutrient in the system. In this graph, the activation polarization region affected by activation losses, the ohmic polarization region where resistance losses occur, and the concentration polarization region affected by mass transfer losses are clearly seen in a typical fuel cell polarization curve.

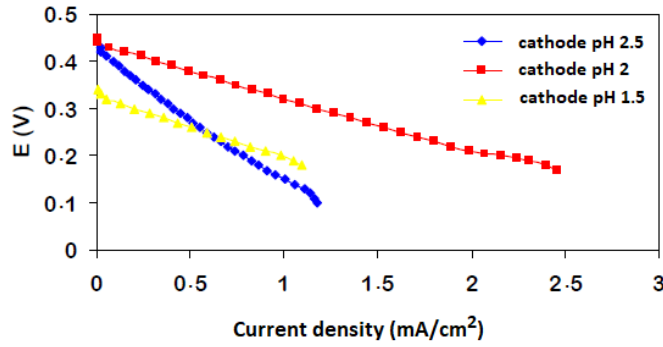


Figure 24. Anode in the system: pH 8, Tafel curves at different cathode pH values in conditions where the nutrient is acetate (Sistemdeki anot: pH 8, Besin maddesinin asetat olduğu koşullarda farklı katot pH değerlerinde Tafel eğrileri)

According to this graph, the cathode pH value is 1.5 while the initial potential is 0.34 V. This value is 0.46 V at cathode pH 2 and 0.44 V at cathode pH 2.5. Activation losses are less at cathode pH 2 compared to other pH values. Again, in the case of cathode pH 2, the system reached a higher current density value than in other cases. This value has reached 2.5 mA/cm^2 .

In Figure 24, the power-current density curves obtained for the same conditions are given. Again,

the highest power value of 0.45 mW was reached when the cathode pH was 2. At other pHs, the obtained powers remained small as 0.15 and 0.2 mW. When these results are combined with the open circuit potential measurement results, the most suitable conditions for the fuel cell system are at the anode:

acetate fed, pH 8, and cathode: pH 2 was determined.

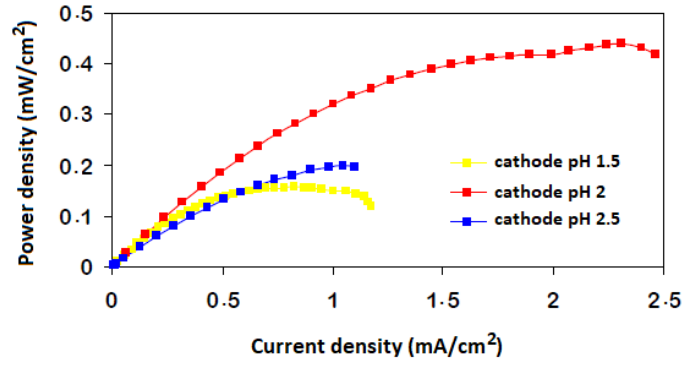


Figure 25. Current density-power curves obtained at different cathode pH values under conditions where the anode: is pH 8, and the nutrient medium is acetate (Anodun pH 8 olduğu ve besin ortamının asetat olduğu koşullar altında farklı katot pH değerlerinde elde edilen akım yoğunluğu-güç eğrileri)

The graph given in Figure 25 shows the differential pulse voltammetry (DPV) result of the MFC measured under the conditions of anode: pH 8, nutrient acetate.

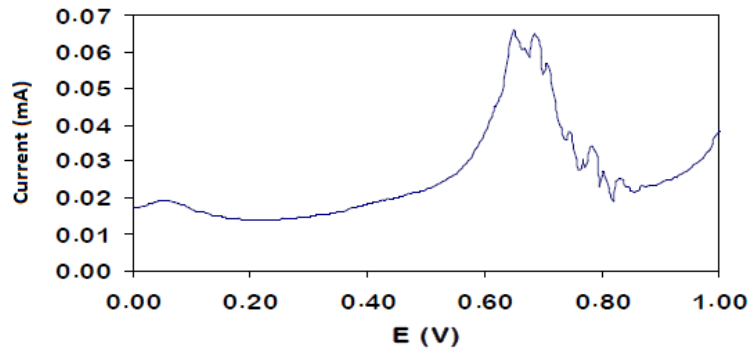
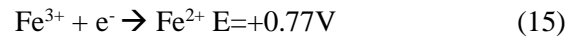


Figure 26. Anode in the system: pH 8, differential pulse voltammetry (DPV) graph obtained under nutrient acetate conditions (Sistemdeki anot: pH 8, besin asetat koşullarında elde edilen diferansiyel pulse voltammetri (DPV) grafiği)

In Figure 26., a peak with a potential value of +0.77V has occurred. This potential is the reduction potential of Fe^{+3} to Fe^{+2} realized at the cathode. This reduction reaction takes place on the cathode surface.

4. CONCLUSION (SONUÇ)

MFC systems' performance is affected by many biological and electrochemical factors. The important factors are pH, substrate, and the electrode material used. In this study performance measurements of the MFC system using *Thiobacillus ferrooxidans* as the cathode bacteria were carried out. For the MFC system using *Thiobacillus ferrooxidans* in cathode and mixed culture anaerobic bacteria in anode, the system open circuit potential values were measured at different

anode and cathode pH values, and when different anode nutrient was used.

Conditions where the system reaches 0.8 V open circuit potential; the anode pH value was determined as 8, cathode pH value was determined as 2. In cases where sucrose, glucose, and acetate are used as anode nutrients, acetate with an open circuit potential of 0.7 V was seen as the most suitable nutrient.

According to cyclic voltammetry and differential pulse voltammetry measurements, the anode: pH 8 in the system is optimized for Tafel curves and power density values at different cathode pH values under conditions where the nutrient is acetate. According to the results, the system's current

density value is 2.5 mA/cm² and the highest power value is 0.45 mW.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

This study is derived from the doctoral thesis titled "The analysis of electron transfer mechanism within fuel cell systems: electrochemical and microbial approaches" completed by Işıluy Ulusoy, under the supervision of, Prof.Dr. Anatoli Dimoglo, at the Department of Environmental Engineering at Gebze Technical University, in 2012.

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)

Işıluy BİLGİÇ: She conducted the research, analyzed the results and performed the writing process.

Araştırmayı 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] Prasad, D., Sivaram, T. K., Berchmans, S., & Yegnaraman, V., Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent, *Journal of Power Sources*, 160(2), (2006) 991-996.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.051>

[2] Ter Heijne, A., Hamelers, H. V., De Wilde, V., Rozendal, R. A., & Buisman, C. J., A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel

cells, *Environmental science & technology*, 40(17), (2007) 5200-5205.

<https://doi.org/10.1021/es0608545>

[3] von Heijne, G., Membrane-protein topology, *Nature reviews Molecular cell biology*, 7(12), (2006) 909-918.

<https://doi.org/10.1038/nrm2063>

[4] Rawlings, D.E., & Kusano, T., Molecular genetics of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Microbiological Reviews*, 58(1), (1994) 39-55.

<https://doi.org/10.1128/mr.58.1.39-55.1994>

[5] Derya Yüksel Köseoğlu, Microbiological Iron Removal (Master Thesis-Environmental Engineering-Gebze Technical University) (2005)

[6] Rzhepishevskaya, O., Physiology and Genetics of *Acidithiobacillus* species: Applications for Biomining (Doctoral dissertation, Molekylärbiolegi (Teknisk-naturvetenskaplig fakultet)) (2008).

[7] Barrett, M. L., Harvey, I., Sundararajan, M., Surendran, R., Hall, J. F., Ellis, M. J., ... & Hasnain, S. S., Atomic resolution crystal structures, EXAFS, and quantum chemical studies of rusticyanin and its two mutants provide insight into its unusual properties, *Biochemistry*, 45(9), (2006) 2927-2939.

<https://doi.org/10.1021/bi052372w>

[8]

http://www.biophysics.liv.ac.uk/images/rusti_ribbon.jpg

[9] Abergel, C., Nitschke, W., Malarte, G., Bruschi, M., Claverie, J. M., & Giudici-Ortoni, M.T., The structure of *Acidithiobacillus ferrooxidans* c4-cytochrome: a model for complex-induced electron transfer tuning, *Structure*, 11(5), (2003) 547-555.

[DOI 10.1016/S0969-2126\(03\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0969-2126(03)00072-8)

[10] Schrader, J. A., & Holmes, D.S., Phenotypic switching of *Thiobacillus ferrooxidans*, *Journal of bacteriology*, 170(9), (1988) 3915-3923.

<https://doi.org/10.1128/jb.170.9.3915-3923.1988>

[11] Harrison Jr, A.P., The acidophilic thiobacilli and other acidophilic bacteria that share their

habitat, Annual review of microbiology, 38(1), (1984) 265-292.

[doi: 10.1146/annurev.mi.38.100184.001405](https://doi.org/10.1146/annurev.mi.38.100184.001405)

[12] Lurie, K. A., & Cherkaev, A.V., G-closure of a set of anisotropically conducting media in the two-dimensional case, Journal of optimization theory and applications, 42, (1984) 283-304.

<https://doi.org/10.1007/BF00934300>

[13] Nemati, M., & Webb, C., Combined biological and chemical oxidation of ferrous sulfate using immobilised *Thiobacillus ferrooxidans*, Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology, 74(6), (1999) 562-570.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660)

Plaka Kanatlı Isı Dağıtıcı Termal Performansının Deneysel Olarak Zorlanmış Konveksiyonda İncelenmesi

Vahit ÇORUMLU^{1*} , Mesut ABUŞKA² 

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Akhisar Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 45200, Manisa, Türkiye

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Akhisar Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, 45200, Manisa, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/04/2023
Düzeltilme: 24/10/2023
Kabul: 26/10/2023

Anahtar Kelimeler

Isı Dağıtıcı
Plaka kanat
Zorlanmış konveksiyon
Termal performans

Article Info

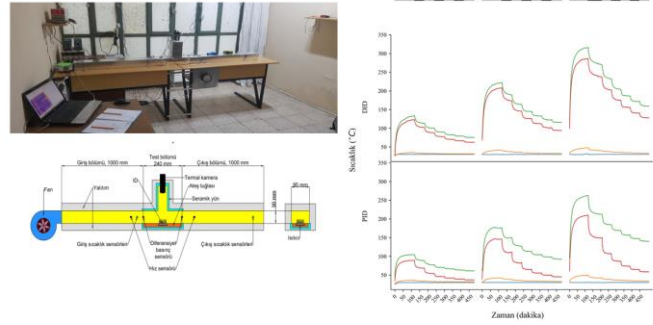
Research article
Received: 10/04/2023
Revision: 24/10/2023
Accepted: 26/10/2023

Keywords

Heat sink
Plate fin
Forced convection
Thermal Performance

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada plaka kanatlı ısı dağıtıcının bir rüzgar tüneline zorlanmış taşınım altında termohidrolik performansı araştırılmıştır. Deneysel 7 farklı hava hızında ve 3 farklı ısıtma gücünde gerçekleştirilmiştir. / In this study, the thermohydraulic performance of a plate fin heat sink under forced convection in a wind tunnel is investigated.



Şekil A: Deneysel kurulum ve zamana bağlı sıcaklık ölçümleri / **Figure A:** Experimental setup and time-dependent temperature measurements

Önemli noktalar (Highlights)

- Plaka kanatlı ısı dağıtıcının zorlanmış konveksiyonda termal ve hidrolik performansları deneysel olarak incelenmiştir. / Thermal and hydraulic performances of the plate-fin heat sink in forced convection were examined experimentally.
- Yüzey sıcaklıklarında PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 30,75 °C, 58,3 °C ve 82,22 °C daha düşüktür. / At surface temperatures, PID is 30.75 °C, 58.3 °C and 82.22 °C lower for powers than DID, respectively.
- Güç artışıyla THP'de PID modelin avantajı azalmıştır. / The advantage of the PID model in THP decreased with the increase in power.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın temel amacı, elektronik komponentlerin güvenli çalışmasını sağlayan ve sıcaklık kontrolünü sağlayan bir ısı dağıtıcı tasarlamak ve karakterize etmektir. / The main objective of this study is to design and characterize a heat sink that provides safe operation and temperature control of electronic components.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, elektronik komponentlerin termal performansını artırmak için plaka kanatlı ısı dağıtıcılarının bir tasarımını sunmaktadır. / This study presents a design of plate fin heat sinks to improve the thermal performance of electronic components.

Bulgular (Results): Çalışma sonuçları, plaka kanatlı modelin düz tip bir ısı dağıtıcıya göre belirli avantajlar sunduğunu göstermektedir. / The study results show that the plate finned model offers certain advantages over a flat heat sink.

Sonuç (Conclusion): Termal direnç ve termo hidrolik performans açısından çalışmanın sonuçları, plaka kanatlı ısı dağıtıcının elektronik komponentlerin soğutulmasında etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir. / The results of the study in terms of thermal resistance and thermo hydraulic performance show that the plate fin heat sink is an effective solution for cooling electronic components.



Plaka Kanatlı Isı Dağıtıcı Termal Performansının Deneysel Olarak Zorlanmış Konveksiyonda İncelenmesi

Vahit ÇORUMLU^{1*} , Mesut ABUŞKA² 

¹Manisa Celal Bayar University, Akhisar Vocational School, Department of Electrical and Energy, 45200, Manisa, Turkey

²Manisa Celal Bayar University, Akhisar Vocational School, Department of Machine, 45200, Manisa, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/04/2023
Düzeltilme: 24/10/2023
Kabul: 26/10/2023

Anahtar Kelimeler

Isı Dağıtıcı
Plaka kanat
Zorlanmış konveksiyon
Termal performans

Öz

Elektronik komponentlerin soğutulması belirli sıcaklık aralığında güvenli çalışmalarını temin eden başlıca ve yaygın yöntem ısı dağıtıcılar olup en çok kullanılan geometrilerin başında ise plaka kanat yapısı gelmektedir. Bu çalışmada 80x80x5 mm taban plakası ölçüsü üzerine 10 mm yüksekliğe sahip 10 adet kanata sahip bir plaka kanatlı ısı dağıtıcı (PID) tasarlanarak imal edilmiş ve termal karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak rüzgâr tüneli tipinde bir test düzeneği kurulmuştur. Test kanalı en-boy oranı 3,16 olarak belirlenmiştir. Testler 30°C ortam sıcaklığında zorlanmış konveksiyon şartlarında (2000-16000 Re sayısı aralığında) 33-66-99 W ısı güçlerinde icra edilmiştir. Testlerde karşılaştırma amacıyla düz tip bir ısı dağıtıcı (DİD) kullanılmıştır.

Güç ortalaması dikkate alınarak plaka model düze göre yüzey sıcaklıklarında 57°C ve eklem sıcaklıklarında 30,5°C'lik avantaj sağlamıştır. Nu sayısında plakalı model düze göre güçler için sırasıyla %79, %35 ve %38 daha yüksek olup buradan bariz olarak 33 W'ta oldukça iyi bir ısı transfer performansı sergilemiştir. Termal dirençte plakalı model düze göre güçler için sırasıyla 0,61, 0,50 ve 0,39 K/W daha düşük değerlere sahip olup güç artışıyla azalan bir eğilim göstermiştir. Plakalı modelin basınç kaybı düze göre güçler için sırasıyla 0,88, 0,75 ve 1,13 Pa yüksek gerçekleşmiştir. Basınç kaybındaki bu küçük farkların, plakalı modelin akışa paralel kanatlara sahip olmasının payı büyüktür. Termo hidrolik performansta (THP) ise plakalı model düze göre güçler için sırasıyla %40, %10 ve %10 avantaj sağlamış ve özellikle 33 W için bariz yüksek bir performans sergilemiştir. Güç artışıyla THP'deki plakalı modelin avantajı azalmıştır.

Experimental Investigation of Plate Fin Heat Sink Thermal Performance in Forced Convection

Article Info

Research article
Received: 10/04/2023
Revision: 24/10/2023
Accepted: 26/10/2023

Keywords

Heat sink
Plate fin
Forced convection
Thermal Performance

Abstract

The main and common method that ensures safe operation of electronic components within a certain temperature range by cooling them is the heat sinks, and the plate-fin structure is one of the most used geometries. In this study, a plate-fin heat sink (PHS) with 10 fins of 10 mm height on a base plate size of 80x80x5 mm was designed and manufactured and a wind tunnel type test setup was established to determine its thermal characteristics. The test channel aspect ratio was determined as 3.16. The tests were carried out under forced convection conditions (in the range of 2000-16000 Re number) at 33-66-99 W thermal powers at 30°C ambient temperatures. A flat type heat sink (FHS) was used in the tests for comparison purposes.

Considering the average powers, the plate model has an advantage of 57 °C at surface temperature and 30.5 °C at junction temperature, compared to flat one. The plate model in Nu number is 79%, 35% and 38% higher for the powers, respectively, compared to the flat model, and it clearly showed a very good heat transfer performance at 33 W. In thermal resistance, the plate model had lower values of 0.61, 0.50 and 0.39 K/W for the powers, respectively, compared to the flat, and showed a decreasing trend with the increase in power. The pressure drop of the plate model was 0.88, 0.75 and 1.13 Pa higher for the powers compared to the flat one, respectively. These small differences in pressure drop are due to the fact that the plate model has fins parallel to the flow. In thermo-hydraulic performance (THP), the plate model provided a 40%, 10% and 10% advantage for the powers, respectively, compared to the flat one, and showed a significantly higher performance, especially for 33 W. With the increase in power, the advantage of the plate model in THP decreased.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik ve elektronik sektöründeki hızlı gelişime paralel soğutulması gereken donanımların ısı ve elektriksel yükleri artmaktadır. Isıl yükleri artan donanımların soğutulması, eklem sıcaklıklarının güvenli çalışma sıcaklık aralıklarında tutulması donanım ve sistem ömürlerini etkileyen başlıca etkenlerden biridir. Öyle ki elektronik donanımların uygun olmayan yüksek sıcaklıklarda çalışması sonucu %55 oranında elektronik donanım arızasına sebebiyet vermektedir [1]. Ayrıca yüksek sıcaklıkta çalışmak zorunda kalan elektronik donanımların kullanım ömürleri kısalmaktadır. Dolayısıyla elektronik donanımların termal yönetimleri oldukça önem kazanmaktadır. Elektronik donanımların soğutulmasında en çok kullanılan yöntemlerin başında ısı dağıtıcılar gelmekte olup bu yöntem hem düşük maliyetli hem de verimlidir. Isı dağıtıcılar genellikle ısı iletim katsayısı yüksek malzemeden mamul ve yüzey alanı büyük olarak tasarlanırlar. Isı dağıtıcılarda yüzey geometrisi, malzeme ve akış tipi termal performansı etkileyen başlıca etkenlerdir. Isı dağıtıcı tasarımlarında genel yaklaşım basitlik ve düşük maliyet eksenindedir. Isı dağıtıcılar kullanım yerine, ısı yüküne ve işgal edilen hacme bağlı olarak doğal veya zorlanmış konveksiyon şartlarında kullanılmaktadır. Yüzey yapısına bağlı olarak akışkan akışının blokajı gerek termal performansı gerekse de basınç kaybı açısından tasarım parametrelerinin optimizasyonunu gerektirmektedir. Literatürde yüzey yapısına ilişkin birçok çalışma bulunmakta olup yüzey yapısı modifikasyonları ile ısı transfer alanı artırılıp türbülans oluşturulmakta ve termal performans iyileştirilmektedir. Bu kapsamda karşımıza çıkan başlıca kanat geometrilerinden biri de plaka kanat yapısıdır. Plaka kanatlı ısı dağıtıcıların tercih edilme nedenlerinin başında akışa paralel kanat yapısıyla göreceli olarak düşük basınç kaybı ve kanat yüksekliğinin ısı dağıtıcı boyunca süre gelebilmesiyle yüksek ısı transfer alanına sahip olmasıdır. Bu çalışmanın içeriğine paralel olarak mümkün olduğu kadar literatürdeki benzer kanat geometrileri ve test koşulları dikkate alınmıştır.

Li ve Chao [2] Reynolds sayısı, kanat boyu ve genişliği açısından çapraz akışlı plaka kanatlı ısı dağıtıcısının performansını deneysel olarak incelemiştir. Reynolds sayısının artışıyla termal direncin azalan eğimle düştüğünü ve belirli bir Reynolds sayısında ısı transfer artışının sınırlandığını belirtmişlerdir. Kanat genişliğinin artmasıyla akış kanalının sınırlandığını ve genişliğin azaltılması ile de ısı transfer alanının düşmesiyle performansı negatif etkilediği, dolayısıyla optimum kanat genişliği için yüksekliği

artırmanın performansa katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Karabulut ve Alnak [3] mikroçip soğutulmasına yönelik sur ve dikdörtgen şeklindeki bakır plakalı yüzeylerin 1000 W/m^2 ısı akısında hava jeti akışı ile soğutulmasını sayısal ve deneysel olarak 4000-10000 Reynolds sayısı ve jet-plaka arası uzaklık (H/D_h) için 4-10 şartları için incelemiştir. 4000 Reynolds sayısı ve $H/D_h=4$ değerleri için sur desenli yüzeylere göre dikdörtgen desenli yüzeylerde %31,45 daha yüksek ortalama Nu sayısı değeri elde edilmiştir.

Özdiilli ve Şevik [4] kanat kullanımının ve geometrik modifikasyonların ısı transferini önemli derecede artırdığı, spesifik olarak ise konvektif ısı transfer katsayısında standart modele göre Model 1'in (trapez bükümlü ve yüzgeç kanatçıklı plakalı ısı dağıtıcı) %44-51 arasında, Model 2'de (köşeleri kesik trapez bükümlü ve yüzgeç kanatçıklı plakalı ısı dağıtıcı) ise %57-62 arasında artışın herhangi bir kütle artışı olmaksızın kaydedilmiştir. Ayrıca termal dirençte de %30'a varan iyileştirilme elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, ısı kaynağına yakınındaki yüzgeç tipi kanatçıkların artırılmasının ve çalışmayan alanların azaltılmasının ısı dağıtıcı termal performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

İnci ve Bayer [5] kare, silindir ve plaka kanatlı ısı dağıtıcılarının ısı transferi artışına yönelik geometrik optimizasyonu geçiş rejimindeki dış akışta sayısal olarak incelemiştir. Taban plakası en yüksek sıcaklığının, silindir kanatlı modelde diğerlerine göre yaklaşık %4,5 oranında daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir.

Chingulpitak vd. [6] kanat yanallarına delik modifiyesi yapılmış plaka kanatlı ısı dağıtıcı ile standart plaka kanatlı ısı dağıtıcının değişik delik çapı (4-7-10 mm) ve sayısı (14-27-75 adet) için termal performansını test etmişlerdir. Isı transfer katsayısında en iyi sonucu %11,6 artış ile 75 adet 3 mm çaplı delik modifiyesi sağlarken aynı koşullarda optimize edilmiş modifiye model termal performansı %10,6 ve %28 daha az ısı dağıtıcı malzeme hacmiyle sağlamıştır.

Khan vd. [7] ısı dağıtıcısının toplam termal/akışkan performans değerine; plaka, kare, dairesel ve eliptik kanatların etkisine odaklanmışlardır. Seçilen geometrik unsurlar; ısı transferi, sürtünme, minimum entropi üretimine karşın kanal en-boy oranı ve Re sayısı açısından incelenmiş ve sonuçlardan seçilen kanat yapılarının bu parametrelere bağlı oldukları vurgulanmıştır.

Yüksek Re sayıları için toplam entropi üretimi, düşük en-boy oranı ve büyük çevre uzunlukları açısından en iyi sonucu plaka kanatlı model vermiştir.

Li vd. [8] test tüneline yerleştirilmiş plaka kanatlı ısı dağıtıcının giriş-üst kısmına yerleştirilmiş bir siperin, kanat yüksekliği ile genişliğinin ve Re sayısının termal performansa etkisini incelemişlerdir. Kullanılan siperin by-pass akışını azalttığı ve daha fazla akışkanın kanatlardan geçerek performansı artırdığı belirtilmiştir. Re sayısının artmasıyla termal direncin azalan bir trend ile düştüğünü ve belirli bir Re sayısına kadar performans artışının süregeldiğini vurgulamışlardır. Kanatların genişlemesiyle akışın kısıtlandığı, kanatların daralmasıyla ise ısı transfer alanının azaldığı ve her iki koşulda da ısı transferinin azaldığı belirtilmiştir.

Yu vd. [9] plaka kanatlı ısı dağıtıcı ile yeni tasarım iğne kanatçıklı plaka kanatlı ısı dağıtıcının termal performansı test edilmiştir. İğne kanatçıklı plakalı model standart modele göre termal direnç açısından %30 daha düşük değere sahip olup ve pompalama gücü arttıkça kâr faktörü azalmış ve iğne kanatçıklı plaka kanatlı modelin kâr faktörü, aynı pompalama gücüne sahip plaka kanatlı modele göre yaklaşık %20 daha yüksek çıkmıştır.

Abuşka ve Çorumlu [10] iğne kanatlı ısı dağıtıcılar konusunda konik ve çapraz kesim iğne kanatlı modelleri deneysel olarak kanat yerleşimi açısından zorlanmış konveksiyonda incelemişlerdir. Modifiye şaşırtmalı konik modelin modifiye olmayan modele göre yüzey ve eklem sıcaklıklarında 2-7°C daha düşük değerler elde edilmiştir. Modifiye model termal direnci %3,5 ile %5,8 arasında daha düşük çıkarken termo-hidrolik performansta ise diğer modellere göre %10,9 ile %13,3 arasında avantaj sağlamışlar olup iğne kanatlı ısı dağıtıcılarında kanat yerleşiminin önemine vurgu yapmışlardır.

Çiçek vd. [11] yüksek güçlü LED'lerin soğutulması için bir ısı borulu ısı dağıtıcı tasarlamışlardır. Isı borulu ve borusuz LED'lere 40-100 W arasında güçler uygulayarak performans analizi icra edilmiştir. Kanatlı soğutucunun düşük LED giriş güçlerinde yeterli olduğunu, yüksek LED giriş güçlerinde ise ısı borulu modelin çok daha etkili soğutma sağladığını belirtmişlerdir. İki model arasında LED bağlantı sıcaklıkları arasındaki fark 40 W gibi daha düşük bir güç girişinde 4 °C'ye kadar düşerken, 60 W, 80 ve 100 W güçte sırasıyla 7, 12 ve 15 °C'ye çıkmıştır. 100 W giriş gücünde eklem sıcaklığı için ısı borulu modelde 110 °C değerinde ise 125°C olarak belirlenmiştir.

Kim vd. [12] plaka kanatlı ısı değiştiricide kanat kalınlığının akış yönünde değişimine yönelik optimizasyon çalışması icra etmişlerdir. Bu kapsamda plaka kanatlarını dikdörtgen, üçgen ve ters trapez geometrisinde incelemişlerdir. Isı dağıtıcı modellerindeki kanatçık kalınlığının değişkenliği dikdörtgen kanatlı modele göre termal dirençte %15'e kadar azaltım sağlamıştır. Ayrıca pompalama gücü arttıkça veya soğutucunun uzunluğu azaldıkça termal dirençteki azalmanın miktarı arttığı belirtilmiştir. Böylelikle değişken kanat kalınlığının soğutma çözümlerine katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir.

Gupta vd. [13] plaka kanatlı ısı dağıtıcının kanatları üzerindeki çukur ve çıkıntıları ele aldıkları çalışmada zorlanmış konveksiyonda rüzgâr tüneli tipi bir test düzeneğinde ısı ve akış açısından incelemişlerdir. 6800-15200 Reynolds sayısı aralığında testleri icra etmişlerdir. Kanat sıralarının ısı ve akış performansının önemli ölçüde çukur derinliğinin artışına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Huang ve Tung [14] çalışmalarında sabit hacimde kanat dizisinin taban plakasının ortalama sıcaklığını minimize etmek için dalga şekilli kanat dizisinin optimal şeklini tahmin etmek için nümerik analiz icra ederek deneysel olarak termal kamera ölçümleriyle doğrulamışlardır. Optimal tasarım kanatçık dizisinin (Fin#4), düz plaka (Fin#1), modifiye sinüzoidal plakalı (Fin#2) ve düzenli sinüzoidal plakalı (Fin#3) kanat dizilerinden daha iyi ısı transfer özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Taban plakasının bağlı sıcaklığı sırasıyla %8,78, %1,45 ve %1,35 oranında daha düşük çıkmış ve tasarlanan dalgalı plaka kanat dizisini pratik endüstriyel uygulamalara önemli bir katkı sağlayacağını belirlemiştir.

Ahmed çalışmasında [15] plaka kanatlı ısı dağıtıcının kanat kanallarına monte edilen çıkıntılarının ısı dağıtıcı hidrotermal performansını nümerik olarak optimize etmiş ve çıkıntılarının boyutları, sayıları, konumları ve yönelimlerini çıkıntısız plaka kanatlı ısı dağıtıcıyla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çıkıntılara sahip plakalı ısı dağıtıcının termal performansı 1,55 kat daha iyi belirlenmiş ancak çıkıntı sayısının artışıyla performans artışının azaldığını belirtilmiştir. Aynı termal performans değeri için çıkıntılı modelde %69,65 oranında fan gücü azalmıştır. Ayrıca 15 çıkıntılı ve 5 kanala sahip modelin termo-hidrolik performansı, 9 kanala sahip çıkıntısız modele göre 1,37 kat daha iyi çıkarken aynı zamanda imalat malzemesi miktarında %27,24 düşüş elde edilmiştir.

Karathanassis vd. [16] plaka kanatlı ısı dağıtıcıda kanat sayısının akışa paralel olarak ısı dağıtıcı boyunca artışını ve giriş-çıkış manifoldunu sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ortalama duvar sıcaklığı baz alınarak termal direnç debiye bağlı olarak 0,008-0,014 K/W'dır. Isı dağıtıcı duvar sıcaklığı Reynolds sayısı azalışıyla daha tek düze formasyondadır.

Hussain vd. [17] çalışmalarında plaka kanatlı ısı dağıtıcı kanatlarının taban plakasına birleşim yerlerinde dolgu profilinin termal performans etkisini paralel akış şartlarında incelemişlerdir. Önerilen tasarımın normal plaka kanatlı ısı dağıtıcıya göre aynı koşullarda termal dirençte %18 ve taban plakası sıcaklığında %7,5 avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Tariq vd. [18] plaka kanatlı ısı dağıtıcının kanatları üzerinde dairesel delikler, kare delikler ve yatak oluşturularak iki farklı ısı dağıtıcı önermişler ve sayısal-deneysel olarak 3049-52195 Reynolds sayısı aralığında incelemişlerdir. Önerilen modellerin normal plaka kanatlı ısı dağıtıcıya göre Nusselt sayısında %42,8 ve %35,9 oranında iyileştirme elde edilmiş olup gerek basınç kaybında gerekse imalat malzeme kütlelerinde de azaltım sağlanmıştır.

Culham vd. [19] ısı dağıtıcı malzemesi ısı iletim katsayısı özelinde termal performans etkisini incelemişlerdir. Isı dağıtıcı malzemesi olarak alüminyum alaşımlarının ($k=200\text{W/mK}$) ısı transfer özelliklerinin oldukça iyi olduğunu ve plastik bağlayıcı grafit veya metal parçacık içeren kompozitlerin de ($k=25-100\text{W/mK}$ arası) termal performans da minimum kayıp ile kullanılacaklarını belirtmişlerdir. Düşük ısı iletimine sahip ısı dağıtıcılarda kanat profillerinin genellikle yüksek termal direnci karşılamak üzere kısa ve kalın seçildiğini ve en uygun termal performans için kanat sayısının artırılması gerektiğini böylelikle daha kalın profilli ilave kanatçıkların akışı bloke etmesi sebebiyle fan gücünün arttığını ifade etmişlerdir.

Kanargi vd. [20] düz ve açılı (30° ve 45°) ısı dağıtıcının termo hidrolik performansını sayısal olarak analiz ederek deneysel doğrulamasını icra etmişlerdir. 30° 'lik kanatlara sahip ısı dağıtıcı daha güçlü ikincil hava akış hızlarıyla 45° 'lik modele göre daha iyi performans göstermiştir. 60 W ısıtma gücü için aynı fan güçlerinde düz kanatlı ısı dağıtıcıya göre bağlantı sıcaklığında 16°C 'ye kadar azalma sağlanarak sabit eklem sıcaklığı için açılı kanatlı ısı dağıtıcının fan güç gereksiniminde %75'e varan iyileştirme elde edilmiştir.

Nilpueng vd. [21] normal sinüzoidal dalga plakalı ve çapraz kesimli sinüzoidal dalga plakalı ısı dağıtıcı modellerinin termal performansını test etmişler ve bu kapsamda plaka kanatların şaşırtmalı yerleşimi, hava hızı, taban plaka sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ve hava akışındaki basınç düşümünü incelemişlerdir. Dalga boyu 18,68 mm, genişliği 2 mm ve şaşırtma değişim açısı 0° , 90° ve 180° olan sinüzoidal dalgalı plaka kanatlar kullanılmış, testler 1 ila 5 m/s arasında değişen bir hava hızında ve 70°C , 90°C ve 110°C 'lik bir ısı dağıtıcı taban yüzey sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, daha yüksek şaşırtmalı yerleşim açısının ve hava hızının ısı transfer katsayısı ve basınç kaybında iyileştirmeye neden olurken taban plakası sıcaklığının ısı transfer katsayısı ve basınç düşümünde hafif bir etki gösterdiği belirtilmiştir. Aynı şaşırtmalı yerleşim açısı şartları için çapraz kesimli model sinüzoidal modele göre Nusselt sayısında yaklaşık olarak %5,9-19,1 avantaj sağlamıştır. Termo-hidrolik performansta ise 180° 'ye sahip çapraz kesimli model en yüksek değere sahip olmuştur.

Chingulpitak vd. [22] plaka kanatlı ve çapraz kesimli ısı dağıtıcının termo-hidrolik analizini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. 1,5 mm'lik çapraz kesim uzunluğunun ve 6 olan çapraz kesim sayısının ısı dağıtıcı ısı direncinin, aynı pompalama gücündeki plaka kanatlı ısı dağıtıcıya göre %16,2 daha düşük olduğu bulunmuştur.

Elektronik ve elektrik donanımların soğutularak belirli sıcaklık sınırlarında güvenli çalışmalarını temin eden başlıca ve en yaygın yöntem ısı dağıtıcılar olup en çok kullanılan geometrilerin başında ise plaka kanat yapısı gelmektedir. Bu çalışmada $80\times 80\times 5\text{ mm}$ taban plakası ölçüsü üzerine 10 mm yüksekliğinde 10 adet kanata sahip bir plaka kanatlı ısı dağıtıcı tasarlanarak imal edilmiş ve termal karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak rüzgâr tüneli tipinde bir test düzeneği kurulmuştur. Test kanalı $30\times 95\text{ mm}$ kesit ölçüsüne olup hava akış kanalı en-boy oranı 3,16 olarak belirlenmiştir. Testlerde karşılaştırma amacıyla düz tip bir ısı dağıtıcı kullanılmıştır. Testler 30°C ortam sıcaklığında zorlanmış konveksiyon şartlarında ($2000-16000\text{ Re}$ sayısı aralığında) $33-66-99\text{ W}$ ısı güçlerinde icra edilmiş ve termal karakteristik parametreleri irdelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu bölüm, iki alt başlık halinde sunulmuş olup ilkinde kullanılan ısı dağıtıcı modelleri, deney seti

ve deney prosedürü olup ikincisinde ise termal analize ilişkin matematiksel açıklamalar yer almaktadır.

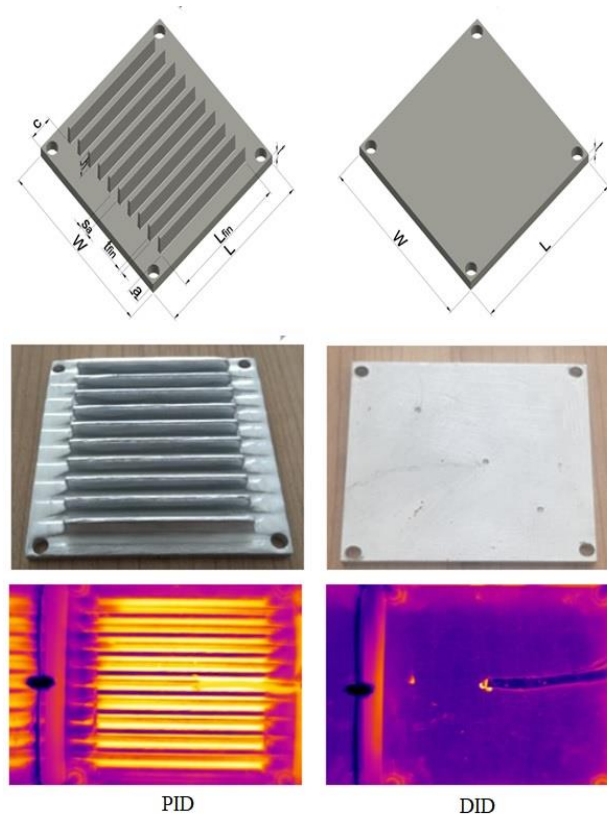
2.1. Deney Seti (Experiment Setup)

Bu deneysel çalışmadaki performans testlerinde elektrikli ısıtıcı ile ortam sıcaklığı 30 °C, ısı dağıtıcı altına yerleştirilen plaka tip ısıtıcı ile ısı dağıtıcı ısı yükleri 33-66-99 W ve rüzgâr tüneli tipi test

düzeneği giriş kanalına takılan bir radyal fan ile akış hızlar 1'den 7 m/s hıza kadar yedi farklı hızda belirlenerek icra edilmiştir. Plaka kanatlı ısı dağıtıcı (PID) modeli test edilmiş ve kanatsız yani düz bir ısı dağıtıcı (DID) [10] modeli ile karşılaştırılmıştır. Isı dağıtıcı modelleri alüminyumdan CNC'de 80x80x5 mm taban plakası ölçülerinde imal edilmişlerdir. İmalatı yapılan ısı dağıtıcıların Teknik özellikleri Tablo 1'de, modellerin fotoğrafları ve teknik şekilleri Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Isı dağıtıcı modellerin özellikleri (Specifications of the heat sink models)

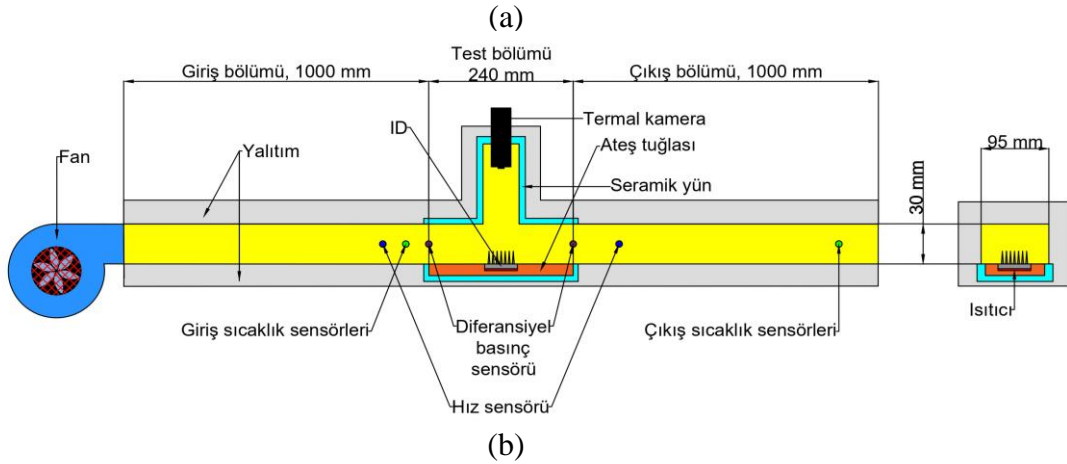
Model	Taban			Kanat								Yüzey alanı (m ²)	Kütle (g)
	W	L	t	no	h	L _{fin}	t _{fin}	s _a	t _d /b _d	a/b	c/d		
PID	80	80	5	10	10	54	2,6	4,33	-	7,5/-	13/-	0,0177	114,3
DID	80	80	5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0064	83,8



Şekil 1. Plaka kanatlı ve düz tip ısı dağıtıcıların teknik resmi, fotoğrafı ve termal resmi (Technical drawing, photo and thermal image of plate finned and flat type heat sinks)

Deney setinin fotoğrafı ve şematik görünüşü Şekil 2’de verilmiştir. Deney seti açık tip rüzgâr tüneli tipi test düzeneği ve ölçüm cihazlarından ibarettir. Açık tip rüzgâr tüneli test düzeneği; bir radyal fan, giriş kanalı, test kanalı, çıkış kanalından oluşmaktadır. Test düzeneğindeki hava akışı bir radyal fan ve fanı kontrol için kullanılan güç kaynağı ile sağlanmıştır. Deney seti için 30x95 mm kesit alanına sahip 240 mm uzunluğunda test bölümü ve 1000 mm uzunluğunda giriş ve çıkış hava kanalları imal edilerek tüm tünel 20 mm’lik XPS izolasyon levhası ile yalıtılmıştır. Isı dağıtıcıların ısı güçlerinin uygulanabilmesi için 80x80x3 mm ölçüsündeki ısıtıcı rezistans kullanılmış ve rezistans ve ısı dağıtıcı için bir ateş tuğlasına yatak açılarak montajı gerçekleştirilmiş ve ısı dağıtıcı, rezistans ve ateş tuğlasının çevresi 5 mm’lik seramik yünü ile izole edilmiştir. Isıtıcı rezistans bir güç kaynağı ile kontrol edilmiştir. Testlerin belirlenen 30°C ortam sıcaklığının sağlanabilmesi için termostat kontrollü iki adet ortam ısıtıcısı kullanılmıştır. Bir termal kamera test bölmesinden 250 mm yükseğe yerleştirilerek gerekli yüzey sıcaklıklarına ilişkin ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir. Giriş hava

sıcaklığı ölçümü için test kanalı girişinde PT1000 tipi iki adet sensör kullanılırken çıkış sıcaklığı için ise beş adet T tipi ısı çift ve iki adet de PT1000 tipi sensör kullanılmıştır. Eklem sıcaklığı ölçümü için ısı dağıtıcıların altına açılan kanallara çapraz üç adet T tipi ısı çift kullanılmıştır. Gerek termal kamera referans sıcaklık ölçümü için gerekse de ısı dağıtıcı yüzey sıcaklık ölçümü için bir adet ısı çift kullanılmıştır. Flir SC325 termal kamera ve ThermoCAM Researcher 2.10 analiz yazılımı, ısı dağıtıcı yüzey sıcaklıklarının ölçümünde kullanılmıştır. Test kanalına giren ve çıkan hava hızı ölçümleri hem pervane tipli bir anemometre ile manuel olarak hem de hot-wire tipi anemometre ile gerçekleştirilmiştir. Yine test kanalı öncesi ve sonrasında basınç kaybı ölçümü için diferansiyel tip analog bir fark basınç ölçer kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı için de bir adet PT1000 tip sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sıcaklık ve hava hızı ölçümü için bir 16 kanallı veri kayıt cihazı kullanılmıştır ve cihazın veri kayıt aralığı 10 saniye olarak belirlenmiştir. Ölçüm cihazlarının özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. (a) Deney seti, (b) şematik görünüş ((a) Experimental setup, (b) schematic view)

Tablo 2. Ölçüm cihazlarının özellikleri (Specifications of measuring instruments)

Sensör / Cihaz	Model	Ölçüm aralığı / Özellik	Hassasiyet
Sıcaklık & Hız	Kestrel 3000	0,4-40 m/s, -29+70 °C	%±3
Hot-wire tip anemometre	Delta Ohm HD403TS1	0,2-40 m/s	±0,2 m/s
Isıl çift	Elimko	-35+250 °C, T-tipi	±0,5°C
Sıcaklık sensörü	Comet SN234	-50+200 °C, PT1000 tip	±0,15°C
Fark basınç ölçer	Magrfhelic	0-100 Pa	%±2
Termal kamera	FLIR SC325	-20-350 °C	±2 °C ya da okumanın %±2'si
Termostat		220V, 50Hz, 10A, -50+110 °C	±0.03°C
Multimetre	CHY 21	Dijital multimetre	±(0.5%+1 hane) V ±(1%+1 hane) A
Radyal fan	Ebmpapst G1G133-DE1-02	2000 min ⁻¹ , 40 W, 16-28 V	
Isıtıcı plaka	BYM Ltd.	0-24 V, maks. 190 W	
Güç kaynağı (ısıtıcı)	Sayntech 23003	0-30 V x 2 ve 5 V, 0-5 A x 2 ve 3 A	
Güç kaynağı (fan)	TT Technic RXN-303D	0-30 V, 0-3 A	
Veri kayıt cihazı	Comet MS6D	16 girişli	
Tartı	Extent JCS-B	Maks. 3 kg	0,1 g

Testler, ortam sıcaklığının belirlenen değere ulaşmasının ardından ki bu yaklaşık bir saat sürmüş olup yine belirlenen ısıl güç değerinde deney seti çalıştırılmış ve yedi farklı hızdaki testler ardışık olarak icra edilmiştir. Sonuçların teyidi için testler çift tekrarlı olarak yapılmıştır. Yapılan ön denemelere binaen 1 m/s deneyi için 120 dk., 2 m/s deneyi için 90 dk. ve diğer hızlar için 60 dk. test süresi olarak belirlenmiştir. Her hız değişimi öncesi manuel ölçümler olan basınç farkı, termal kamera, manuel hava hızı ölçümü gerçekleştirilerek kaydedilmiştir. Ölçüm değerlerinin son 20 dakikalık bölümünün ortalama değerleri termo-hidrolik hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

2.2. Analiz (Analysis)

Isıtıcı rezistans plakaya uygulanan elektriksel güç, ısı dağıtıcıya uygulanan termal güce eşit olup aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\dot{Q}_{EG} = \dot{Q}_{TG} = IV \quad (1)$$

burada \dot{Q}_{EG} , \dot{Q}_{TG} , I ve V sırasıyla elektriksel güç, termal güç, akım ve voltajdır. Ayrıca elektriksel güç, ısı dağıtıcıdan kayıp ısı ve akışkana aktarılan ısının toplamı olup şöyle ifade edilir;

$$\dot{Q}_{EP} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_a \quad (2)$$

burada \dot{Q}_l ve \dot{Q}_a çevreye olan ısı kaybı ve ısı dağıtıcıdan atılan ısı olup akışkana transfer edilen termal güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{o,a} - T_{i,a}) \quad (3)$$

burada \dot{m}_a , $c_{p,a}$, $T_{i,a}$ ve $T_{o,a}$ sırasıyla soğutma havasının kütleli debisi, giriş-çıkış havası sıcaklık ortalamasına göre havanın özgül ısı kapasitesi ve soğutma havasının çıkış-giriş sıcaklıklarıdır. Havanın kütleli debisi hesabı,

$$\dot{m}_a = \rho_a v_a A_{cs} \quad (4)$$

şeklinde olup burada ρ_a , v_a ve A_{cs} sırasıyla havanın ortalama sıcaklığına göre yoğunluğu, havanın ortalama hızı ve havanın kanaldaki akış kesit alanıdır. Havanın ortalama hava sıcaklığı, giriş-çıkış hava sıcaklık ortalaması alınarak yapılır ve aşağıda ifade edilmiştir.

$$T_a = \frac{T_{o,a} + T_{i,a}}{2} \quad (5)$$

Isı dağıtımı, ısı dağıtıcı yüzeyi ile soğutma havası arasındaki konvektif ısı transferi incelenerek belirtilir;

$$\dot{Q}_a = hA_{id}(T_{y,id} - T_a) \quad (6)$$

burada h , A_{id} ve $T_{y,id}$ sırasıyla konvektif ısı transfer katsayısı, ısı transferine konu olan ısı dağıtıcı yüzey alanı ve ısı dağıtıcı yüzey sıcaklığı ile akış havası sıcaklık farkıdır. Böylelikle, konvektif ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$h = \frac{\dot{m}_a c_{p,a}(T_{o,a} - T_{i,a})}{A_{id}(T_{y,id} - T_a)} \quad (7)$$

Soğutma havasının akış karakteristiğini ifade eden Reynolds sayısı ve akış kanalı için hidrolik çap aşağıdaki denklemlerde verilmiş olup;

$$Re = \frac{\rho_a v_a D_h}{\mu} \quad (8)$$

burada D_h ve μ , akış kanalının hidrolik çapı ve havanın ortalama sıcaklığına göre dinamik viskozitesidir.

$$D_h = \frac{2WL}{W+L} \quad (9)$$

Nusselt sayısı aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir;

$$Nu = \frac{hD_h}{k_a} \quad (10)$$

burada k_a havanın ortalama sıcaklığına göre ısı iletim katsayısıdır. R_{th} termal direnç ısı dağıtıcıya uygulanan birim güç sonucu sıcaklık artış miktarı olup toplam termal direnç aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$R_{th} = \frac{T_j - T_{i,a}}{qA} \quad (11)$$

burada T_j eklem sıcaklığı ve qA ise ısı akısıdır. Sürtünme faktörü (f) ise şöyle ifade edilebilir:

$$f = \frac{\Delta P}{4(1/D_h)(1/2)\rho_a v_a^2} = \frac{1}{2} \Delta P \frac{D_h}{\rho_a v_a^2} \quad (12)$$

Isıl analizde önemli performans parametrelerinden biri Termo-hidrolik performans (THP) olup fan güç birim tüketimi dikkate alınarak ısı transferindeki net artışı ifade eder;

$$THP = \frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{1/3}} \quad (13)$$

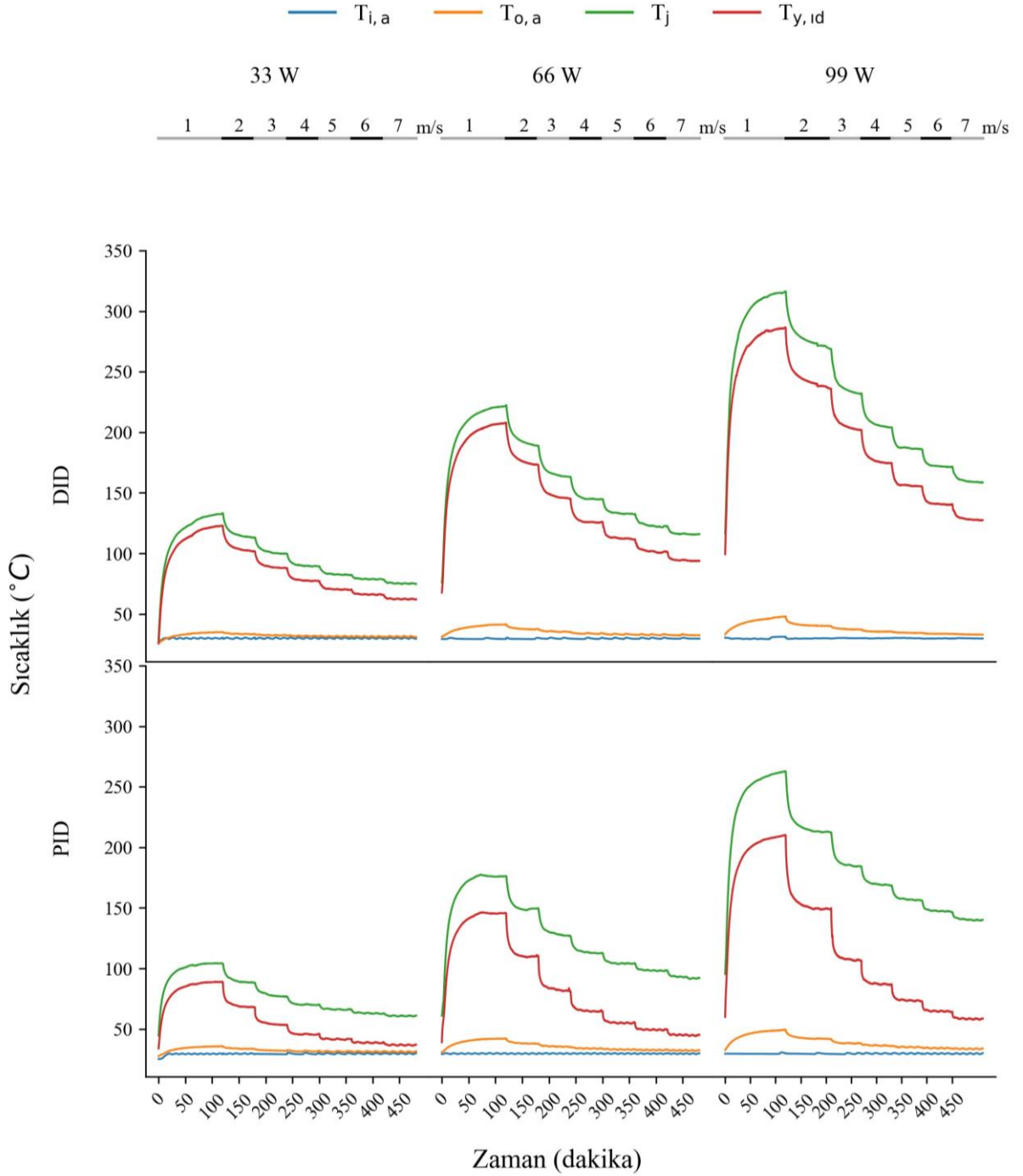
burada f_s düz ısı dağıtıcı için sürtünme faktörüdür. Deneysel ölçümlerdeki belirsizlikler, ölçüm cihazları ve test koşulları gibi çeşitli nedenlerle meydana gelmektedir. Holman [23] tarafından ifade edilen bağıl belirsizlik hesabı aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

3. TARTIŞMA VE ARAŞTIRMA BULGULARI (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde plaka kanatlı (PID) ve düz ısı dağıtıcının (DID) 30 °C ortam sıcaklığı ve zorlanmış konveksiyonda (1 m/s'den 7 m/s'ye, 2000'den 16000'a Re değeri) üç farklı ısıtma gücündeki (33-66-99 W) termal performans test sonuçları verilmiştir.

Ortalama değerlerle giriş havası sıcaklığı ($T_{i,a}$), çıkış havası sıcaklığı ($T_{o,a}$), eklem sıcaklığı (T_j) ve ısı dağıtıcı yüzey sıcaklığı ($T_{y,id}$) değerleri Şekil 3'de sunulmuştur. Ölçülen sıcaklık değerleri yedi hız ve üç ısıtma gücünü kapsamaktadır. Şekil 3'teki ölçüm değerlerine baktığımızda stabil, trend olarak birbirine benzer olup sıcaklıkların rejime girme zamanı da oldukça yakındır. Akışkan hızlarının belirlenen ısı güç için ardışık olarak yapılmasıyla merdiven formasyonu oluşmuş ve akışkan hızının artmasıyla tüm sıcaklık değerleri düşmektedir. Sıcaklık ölçümlerinin son 20 dakikalık bölümün ortalaması analizlerde kullanılmıştır. Doğal olarak en yüksek çıkış havası, yüzey ve eklem sıcaklıkları 1 m/s deneylerinde gerçekleşmiş olup ısıtma güçleri için değerler Tablo 3'te verilmiştir. Bu kapsamda en yüksek çıkış havası sıcaklığı 99 W testinde 1 m/s'de gerçekleşmiş olup bu değer düz ısı dağıtıcıda 47,55 °C iken plakalı modelde 49,04 °C'dir. Yüzey sıcaklığında ise düz model 285,64 °C iken plakalıda 209,28 °C olup fark 76,36 °C'dir. Eklem sıcaklığında durum düzde 315,20 °C olurken plakalıda 261,99 °C olup fark 53,21 °C'dir. Plaka kanatlı ısı dağıtıcının düze göre sıcaklık değerlerindeki bariz fark kanatların varlığına dayalı olarak yüksek ısı transfer alanı ve akış havasındaki oluşan türbülans kaynaklıdır.



Şekil 3. Deneysel sıcaklık ölçümlerinin zamana göre değişimi (Variation of the experimental temperature measurements over time)

Tablo 3. 1 m/s hızda ısıtma güçlerindeki ısı dağıtıcı sıcaklıkları (Heat sink temperatures at 1 m/s velocity)

Model	$T_{o,a}$ (°C)			$T_{y,id}$ (°C)			T_j (°C)		
	33 W	66 W	99 W	33 W	66 W	99 W	33 W	66 W	99 W
DID	34,87	41,18	47,55	122,36	207,15	285,64	132,19	221,14	315,20
PID	35,67	42,02	49,04	88,80	145,55	209,28	104,23	176,02	261,99

Isı dağıtıcı karakteristik sıcaklıkları en yüksek 1 m/s’de gerçekleşirken en düşük sıcaklıklar da 7 m/s’de oluşmuş ve Tablo 4’te ısıtma güçleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4’ten çıkış havası sıcaklıklarını incelediğimizde düz ile plakalı model arasındaki farkın çok küçük olduğu dikkat çekmekte bu durum akış kütleli debisinin yüksekliğindedir. Yüzey sıcaklıklarında; 33 W’ta düz 62,23 °C iken plakalıda 36,73°C olup fark 25,5°C’dir. Eklem sıcaklığında ise fark 14,32°C’dir. Hava akışına paralel kesintisiz paralel kanatların geniş yüzey alanıyla plaka kanatlı ısı

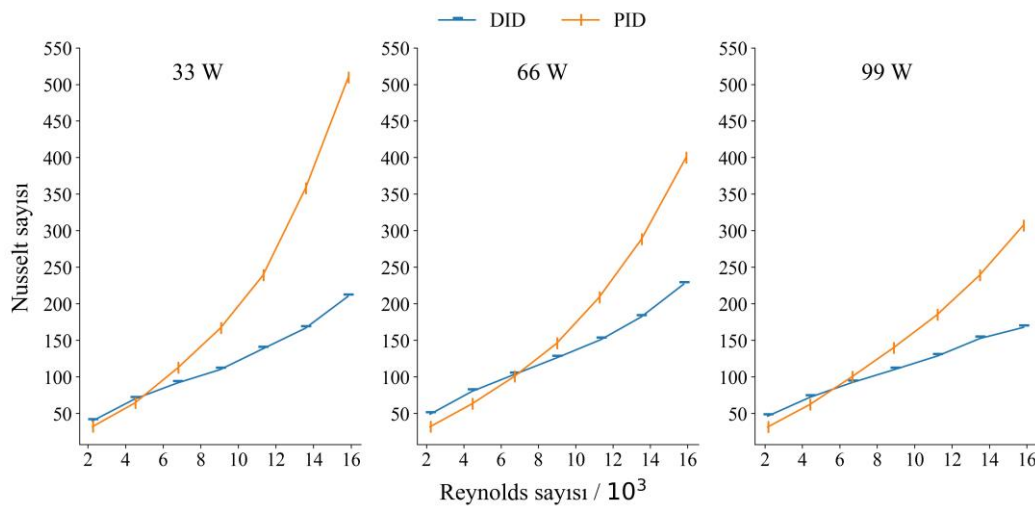
dağıtıcı, yüzey sıcaklıklarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Plaka ısı dağıtıcıda hava akışına paralel olan kanatçıkların diğer bilinen kanat yapılarına, özellikle de akışa dik konumlandırılan kanatlara sahip ısı dağıtıcılara göre yüksek hızlarda kanatçıklar arasında daha az blokaja uğrayan bir hava akışı sağladığı çıkarımı yapılabilir. Böylece hava kanatlar arasından daha rahat akabilmekte, kanatların üzerinden göreceli olarak daha az bypass olarak ve diğer yapılara göre ısı transferini artırmaktadır.

Tablo 4. 7 m/s hızda ısıtma güçlerindeki ısı dağıtıcı sıcaklıkları (Heat sink temperatures at 7 m/s velocity)

Model	T _{o,a} (°C)			T _{y,id} (°C)			T _j (°C)		
	33 W	66 W	99 W	33 W	66 W	99 W	33 W	66 W	99 W
DID	31,23	32,42	32,92	62,23	93,84	127,61	75,08	115,72	158,80
PID	31,19	32,27	33,59	36,73	44,74	58,23	60,76	91,84	139,86

Şekil 4, Re sayısına bağlı olarak ısı dağıtıcı Nu sayılarının değişimini göstermektedir. Isı dağıtıcıların Nu sayısı, giriş güçleri için artan Re sayısı ile artarken termal direnç azalmaktadır. Isı dağıtıcının termal performansı, akış havası hızının yani kütleli debi artışıyla yükselmekte ancak buna karşın basınç kaybı ve buna bağlı olarak fan tüketimi artmaktadır. İlk iki Re değerinde plakalı modelin Nu değerleri az bir farkla düze göre düşük çıkarken diğer tüm Re değerlerinde plakalı model Re sayısının artışına paralel Nu değerleri belirgin olarak artmıştır. Isıtma güçlerini değerlendirecek olursak güç arttıkça Nu değerleri düşmektedir. En

yüksek Nu değeri; en yüksek Re değeri olan 16000 değerinde gerçekleşirken, plakalı model için 33 W’ta en yüksek 509,46, 66 W’ta 399,65 ve 99 W’ta 306,92 iken bu durum düz modelde sırasıyla 210, 226,70 ve 167,66 olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla plakalının düze göre maksimum Nu sayılarındaki fark güçler için sırasıyla 299,46, 172,95 ve 139,26 olarak azalan bir trendde gerçekleşmiştir. Buradan plakalı ısı dağıtıcının göreceli olarak 33 W gibi düşük bir güçte ve yaklaşık olarak 500 ve üstü Re sayılarında en iyi performansı sergilemiştir.



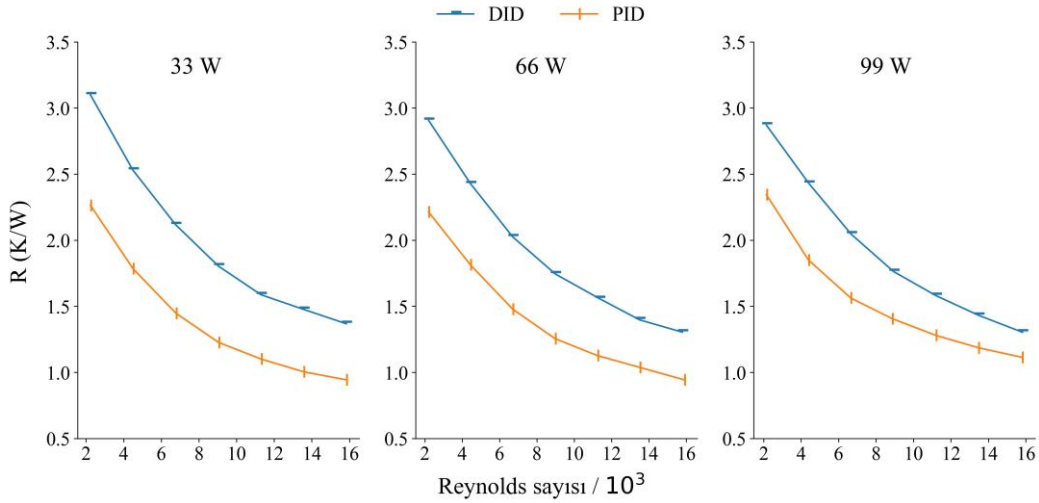
Şekil 4. Nu sayısının Re sayısına göre değişimi (Change of the Nu number according to the Re number)

Isı dağıtıcıya verilen birim enerji başına sıcaklık artışı yani termal direnç, giriş güçleri için Re sayılarına dayalı olarak Şekil 5’te verilmiştir. Isı

dağıtıcıların termal direnç değerleri, Re sayısı artışına zıt olarak düşmektedir. Üç ısıtma gücünde ve tüm hava akış hızlarında, düz model maksimum

termal dirence sahiptir. Yapılan deneylerde tüm soğutucular için ısıtma güçleri ve hava giriş sıcaklıkları aynı olduğundan, ısı dağıtıcıların termal direnç özellikleri eklem sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Soğutma uygulamalarında en kritik göstergelerden biri eklem noktası sıcaklığıdır. Eklem sıcaklığı, soğutulacak cihazın çalışması sıcaklığını gösterir. Bu açıdan değerlendirildiğinde plakalı ısı dağıtıcının, cihazın çalışma sıcaklığını düze göre bariz olarak daha etkin

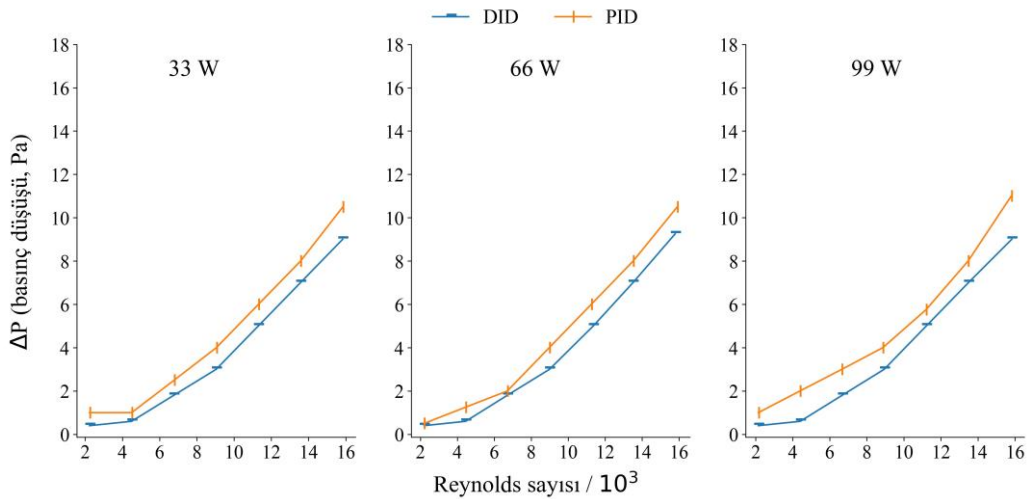
soğuttuğu söylenebilir. En yüksek termal direnç değerlerine tüm test koşullarında düz model sahip olmuştur. En yüksek termal direnç, 1 m/s hava akış hızında ve 33 W ısıtma gücünde 3,10 K/W ile düz modelde iken aynı şartlarda plakalı model 2,26 K/W, en düşük termal direnç değeri ise 7 m/s hava akış hızında ve 33 ve 66 W giriş gücünde 0,94 K/W ile plakalı modelde olup aynı koşulda düz modelin direnci 1,37 K/W'tır.



Şekil 5. Termal direncin Re sayısına göre değişimi (Variation of the thermal resistance according to the Re number)

Şekil 6, giriş güçleri için Re sayısına bağlı olarak ısı dağıtıcıların basınç düşüşünü göstermektedir. Isı dağıtıcılardaki basınç düşüşü, giriş güçleri için artan Re sayısı ile artmaktadır. Tüm ısıtma güçlerinde kaydedilen en yüksek basınç düşüşü, plakalı modelde, 99 W'ta ve 7 m/s hava akışı hızında 11 Pa

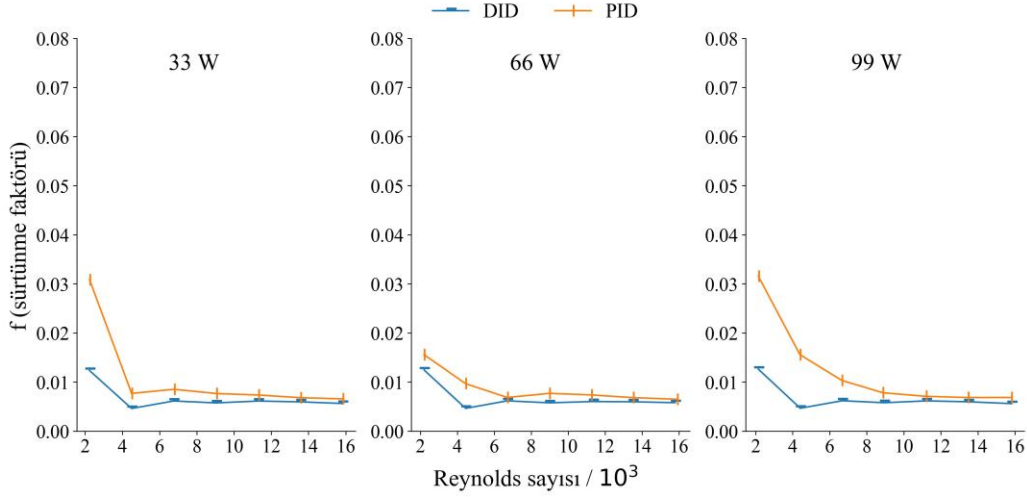
olup düz modelde aynı noktada 9 Pa'dır. Dolayısıyla genel olarak en yüksek basınç farkı değerinin 2 Pa olduğu düşünülürse bu değer plakalı modelin hava akışına paralel kanatlarından dolayı basınç kaybının göreceli olarak düşük kaldığı ve kabul edilebilir bir seviyede kaldığı söylenebilir.



Şekil 6. Basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Variation of the pressure loss according to the Re number)

Şekil 7, giriş güçlerinde ısı dağıtıcıların sürtünme faktörünün Re sayısı ile değişimini göstermektedir. Genel olarak modeller için ilk iki-üç hava akışında artan Re sayısı ile sürtünme faktörü azalır ancak

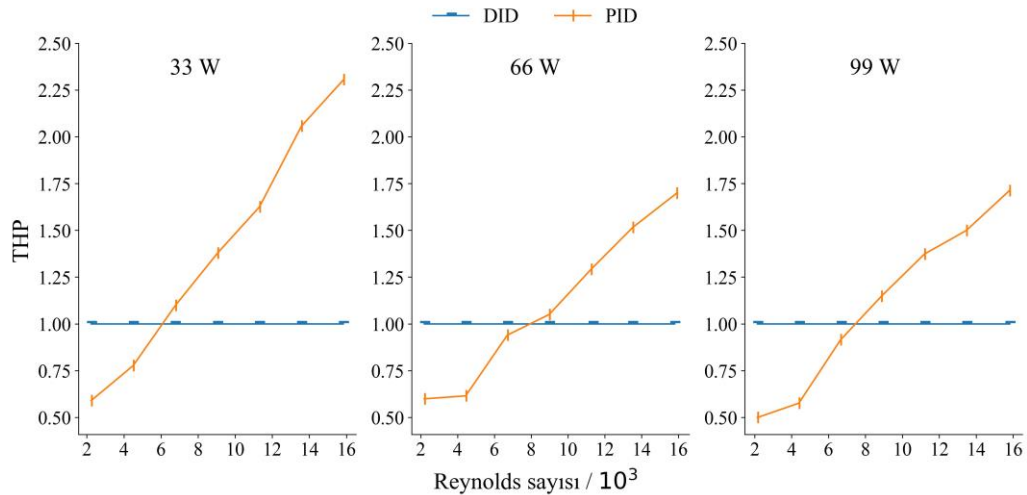
diğer hava akışlarında ise sürtünme faktörü önemli bir değişim göstermemekle birlikte düz ve plakalı modelin sürtünme faktörleri birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Variation of the friction factor according to the Re number)

Şekil 8, ısıtma güçlerinde Re sayısına bağlı olarak soğutucuların termo-hidrolik performansını göstermektedir. Düz ısı dağıtıcı baz karşılaştırma olduğu için THP'sı 1 olarak alınmıştır. Genel olarak, üç farklı giriş gücü için artan Re sayısı ile termo-hidrolik performans artmaktadır. Genel olarak ısıtma güçleri için 2100 ile 6800 Re sayıları arasında plaka modelin sürtünme faktörü azalırken Nu sayısı artmaktaydı. Bu Re aralığında Nu sayısı ve sürtünme faktörünün THP üzerindeki etkileri birlikte gözlenmektedir. 6800'den büyük Re değerlerinde plaka modelin sürtünme faktöründe önemli bir değişiklik olmadığından Nu sayısının THP üzerindeki etkisi ağırlıklı olarak bu bölgede görülmektedir. Plakalı ısı dağıtıcının 33 W'taki

değerleri genel olarak 66 ve 99 W göre daha yüksek olurken 66 ve 99 W'ta birbirlerine yakın çıkmıştır. Plakalı modelin THP'sı 33 W'ta en yüksek değeri 2,3, 66 W'ta 1,70 ve 99 W'ta 1,71 olarak 7 m/s hızda gerçekleşmiştir. Genel olarak ilk üç Re değerinde plakalı modelin THP'sı düze göre daha düşük kalmıştır. Buradan plakalı ısı dağıtıcının değerlendirmesini THP açısından genel olarak yapacak olursak yaklaşık 6000 Re değerinden yukarı Re değerlerinde kullanımının tavsiye edilebileceği çıkarılabilir. Aynı şekilde güç açısından duruma bakılacak olursa 66 ve 99 W gibi göreceli olarak yüksek güçler için THP seviyesi artmamaktadır.



Şekil 8. THP'nin Re sayısına göre değişimi (Variation of the THP according to the Re number)

Yukarıdaki açıklamalar ve yorumlarda genellikle en yüksek veya en düşük değerler dikkate alınmıştır. Ancak tüm hızlardaki değerlerin ortalaması bize genel bir değerlendirme yorumu sağlayacaktır. Termal parametrelerin tüm hızlardaki ortalamaları Tablo 5'de verilmiştir. Plakalı ısı dağıtıcı 33 W'daki

ortalama değerleri tüm değerler içinde en avantajlı değerler olup termal performans karakteristiklerinden yüzey sıcaklığı 53,27 °C, eklem sıcaklığı 75,61 °C, Nu sayısı 211,59, termal direnç 1,40 ve THP 1,40'dır.

Tablo 5. Termal parametrelerin tüm hızlardaki ortalamaları (Means of thermal parameters at all velocities)

Model	Güç W	T _{i,a} (°C)	T _{o,a} (°C)	T _{y,id} (°C)	T _j (°C)	Nu	R _{th} (K/W)	f	ΔP (Pa)	THP
PID	33	29,56	32,43	53,27	75,61	211,59	1,40	0,011	4,71	1,40
	66	29,73	35,32	78,70	122,77	176,71	1,41	0,009	4,61	1,10
	99	29,73	38,28	106,87	181,64	151,97	1,53	0,012	4,96	1,10
DID	33	29,96	32,32	84,01	95,86	117,96	2,00	0,007	3,83	1,00
	66	29,69	35,13	137,00	155,66	131,13	1,91	0,007	3,86	1,00
	99	30,07	37,30	189,09	219,90	109,88	1,92	0,007	3,83	1,00

Tablo 6. Literatür karşılaştırma tablosu (Literature comparison table)

Referans	ID özellikleri	Isı akısı (W/m ²)	Re	R (K/W)	ΔP (Pa)
Bu çalışma	PID, kanat sayısı 10, kanat yüksekliği 10 mm, kanat kalınlığı 2,6 mm	5156	2236	2,26	1
			4496	1,78	1
			6782	1,44	2,5
			9049	1,22	4
			11310	1,10	6
			13576	1,00	8
			15848	0,94	10,5
[24]	PID, kanat sayısı 12 ve 9, kanat yüksekliği 10 mm, kanat kalınlığı 1,5 mm	3587	2685	2,77	4,98
			5537	1,81	13,19
			7485	1,49	20,82
			11520	1,13	40,46
			14010	1,01	56,30
[9]	PID, kanat sayısı 9, kanat yüksekliği 10, kanat kalınlığı 1,5 mm	3845	5662	1,50	17,14
			7360	1,30	25,71
			9059	1,20	31,42
			11323	1,08	41,42
			13814	0,98	55,71

Literatürde bu çalışmaya gerek ısı dağıtıcı tipi gerekse test koşulları açısından en yakın bazı çalışma sonuçlarının karşılaştırma sonuçları tablosu aşağıda Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'daki karşılaştırılan ısı dağıtıcı modelleri ve test koşulları benzer olsa da aynı değildir. Bu çalışma ve Yu vd. [9] yaptığı çalışmanın ortak kesişim noktası 9049 ve 9059 Re sayısı olarak ele alınabilir. Bu Re sayısında

ısı güçleri arasında birim alanda 1311 W'lık fark bulunmaktadır. Termal direnç değerleri sırasıyla 1,22 ve 1,20 K/W'tır. Basınç kaybında ise durum 4 ve 31,42 Pa'dır. Termal direnç değerleri birbirine yakın olsa da basınç kaybında yaklaşık 7 katlık bir fark bulunmaktadır. Bu farkın test kanalı en-boy oranına bağlanabilir. Jonsson ve Moshfegh'in [24] çalışmasında 11520 Re sayısı değeriyle bu

çalışmadaki 11310 Re sayısı termal parametreleri ele alacak olursak öncelikle birim alana uygulanan ısı gücünde 1569 W'lık fark olduğunu vurgulamak gerekmektedir. Termal direnç sırasıyla 1,10 ve 1,13 K/W gibi oldukça birbirine yakın değerlere sahiptir. Basınç kaybında ise durum 6 Pa'a 40,46 Pa'dır. Genel olarak bu çalışmadaki sonuçlardan termal direnç değeri literatürle uyumlu olurken basınç kaybında ise pozitif ayrıştığı söylenebilir. Bu durum test kanalı en-boy oranına bağlanabilir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada plaka kanatlı ısı dağıtıcı, düz ısı dağıtıcı ile karşılaştırmalı olarak zorlanmış konveksiyonda termal ve hidrolik performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, 33 W, 66 W, 99 W ısıtma güçlerinde, Re sayısı 2000 ile 16000 arasında yedi hava akış hızında ve 30 °C sabit ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçların yedi hızdaki ortalama değerlerine göre güçler açısından elde edilen bulgular şunlardır:

- Yüzey sıcaklıklarında PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 30,75 °C, 58,3 °C ve 82,22 °C daha düşüktür.
- Eklem sıcaklıklarında PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 20,25 °C, 32,89 °C ve 38,26 °C daha düşüktür.
- Nu sayısında PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 93,63, 45,58 ve 42,09 daha yüksek olup buradan bariz olarak 33 W'ta çok daha iyi bir ısı transfer performansı sergilemiştir.
- Termal dirençte PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 0,61, 0,50 ve 0,39 K/W daha düşük değerlere sahip olup güç artışıyla azalan bir eğilim göstermiştir.
- Basınç kaybında PID, DID'a göre güçler için sırasıyla 0,88, 0,75 ve 1,13 Pa daha yüksek olup en bu değerlerin paralel plaka kanatlara sahip PID modelin göreceli olarak düşük basınç kaybı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.
- THP'de ise PID, DID'a göre güçler için sırasıyla %40, %10 ve %10 avantaj sağlamış ve buradan özellikle 33 W için bariz bir performans yüksekliği elde edilmiştir. Güç artışıyla THP'deki PID modelin avantajı azalmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen perspektifle gelecek vizyonunda plaka kanatlı ısı dağıtıcı modeli bazında kanat kalınlığı ve yüksekliğinin optimizasyonu, plaka kanat üzerinde yüzey alanını artıracak ancak

kütle miktarını da düşürecek modifikasyonlar incelenebilir.

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)

Vahit ÇORUMLU: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Mesut ABUŞKA: 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] Khattak Z, Ali HM., Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: A critical review, International Journal of Heat and Mass Transfer ,130 (2019) 141-161.
- [2] Li, H.Y., Chao, S.M., Measurement of performance of plate-fin heat sinks with cross flow cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52.13-14 (2009) 2949-2955.
- [3] Karabulut, K., Alnak, D.E., Değişik şekilde tasarlanan ısıtılmış yüzeylerin hava jeti çarpmalı soğutulmasının araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26 No.1 (2020) 88-98.
- [4] Özdilli Ö, Şevik S., Effect of channel and fin geometries on a trapeze plate-fin heat sink performance, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235.5 (2021) 1326-1336.
- [5] Barış, A., Bayer, Ö., Experimental and numerical study on heat transfer performance of

- square, cylindrical and plate heat sinks in external transition flow regime, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 39 (2019) 151-161.
- [6] Chingulpitak, S., Ahn, H. S., Asirvatham, L. G., Wongwises, S., Fluid flow and heat transfer characteristics of heat sinks with laterally perforated plate fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138 (2019) 293-303.
- [7] Khan, W., Culham, J., and Yovanovich, M., The Role of Fin Geometry in Heat Sink Performance, *ASME Journal of Electronic Packaging*, 128 No. 4 (2006) 324–330.
- [8] Li, H. Y., Tsai, G. L., Chao, S. M., Yen, Y. F., Measurement of thermal and hydraulic performance of a plate-fin heat sink with a shield, *Experimental thermal and fluid science*, 42 (2012) 71-78.
- [9] Yu, X., Feng, J., Feng, Q., Wang, Q., Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink, *Applied thermal engineering*, 25 No.2-3 (2005) 173-182.
- [10] Abuşka, M., Çorumlu V., A comparative experimental thermal performance analysis of conical pin fin heat sink with staggered and modified staggered layout under forced convection, *Thermal Science and Engineering Progress*, 37 (2023) 101560..
- [11] Çiçek, B., Ürün, E. & Şahin, N. (2023). Experimental and Numerical Analysis of an Innovative High Power LEDs Thermal Management System, based on Heat Sink- Heat Pipe Design. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11 (3), 824-836. DOI: 10.29109/gujsc.1315135.
- [12] Kim, D. K., Jung, J., & Kim, S. J. (2010). Thermal optimization of plate-fin heat sinks with variable fin thickness. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(25-26), 5988-5995.
- [13] Gupta, A., Kumar, M., & Patil, A. K. (2019). Enhanced heat transfer in plate fin heat sink with dimples and protrusions. *Heat and Mass Transfer*, 55(8), 2247-2260.
- [14] Huang, C. H., & Tung, P. W. (2020). Numerical and experimental studies on an optimum Fin design problem to determine the deformed wavy-shaped heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 151, 106282.
- [15] Ahmed, H. E. (2016). Optimization of thermal design of ribbed flat-plate fin heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1422-1432.
- [16] Karathanassis, I. K., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., & Bergeles, G. C. (2015). Experimental and numerical evaluation of an elongated plate-fin heat sink with three sections of stepwise varying channel width. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84, 16-34.
- [17] Hussain, A. A., Freegah, B., Khalaf, B. S., & Towsyfyan, H. (2019). Numerical investigation of heat transfer enhancement in plate-fin heat sinks: Effect of flow direction and fillet profile. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100388.
- [18] Tariq, A., Altaf, K., Ahmad, S. W., Hussain, G., & Ratlamwala, T. A. H. (2021). Comparative numerical and experimental analysis of thermal and hydraulic performance of improved plate fin heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 182, 115949.
- [19] Richard Culham, J., Khan, W. A., Michael Yovanovich, M., & Muzychka, Y. S. (2007). The influence of material properties and spreading resistance in the thermal design of plate fin heat sinks.
- [20] Kanargi, B., Lee, P. S., & Yap, C. (2018). A numerical and experimental investigation of heat transfer and fluid flow characteristics of an air-cooled oblique-finned heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 393-416.
- [21] Nilpueng, K., Ahn, H. S., Jerng, D. W., & Wongwises, S. (2019). Heat transfer and flow characteristics of sinusoidal wavy plate fin heat sink with and without crosscut flow control. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 565-572.
- [22] Chingulpitak, S., Chimres, N., Nilpueng, K., & Wongwises, S. (2016). Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics of cross-cut heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 142-153.
- [23] Holman JP., *Experimental Methods for Engineers*, 8th ed., New York, McGraw-Hill, (2012).
- [24] Jonsson, H., & Moshfegh, B. (2001). Modeling of the thermal and hydraulic performance of plate fin, strip fin, and pin fin heat sinks-influence of flow bypass. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 24(2), 142-149.

Mobilya Tasarım Sürecinde Toplumların Kültürel Niteliklerinin Etkisi ve Özgün Türk Mobilyasının Tanınırlığının Araştırılması

Önder TOSUN^{1*} , Mustafa ALTUNOK² , İhsan KÜRELİ² , Ali KASAL³ 

¹Ahmet Yesevi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 06350, Altındağ/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 48000, Merkez/MUĞLA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/07/2023
Düzeltilme: 11/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Mobilya
Tasarım
Özgün
Kültür
Türk Mobilyası
Tasarımcı

Article Info

Research article
Received: 15/07/2023
Revision: 11/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Furniture
Desing
Orijinal
Culture
Turkish Furniture
Designer

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, mobilyanın tasarlanması sürecinde toplumların kültürel özelliklerinin mobilya tasarımına etkisi ve özgün Türk mobilyasının tanınırlığı incelenmiştir. / In the process of designing furniture, the influence of cultural characteristics of societies on furniture design and the recognition of original Turkish furniture were examined.

Sıra	Genel Sorular	1	2	3	4	5	X	S
		%	%	%	%	%		
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	1,1	2,8	15,4	38,0	42,7	4,18	0,87
2	Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	2,5	9,1	24,0	40,8	23,7	3,74	1,00
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	1,8	4,7	18,0	36,8	38,7	4,06	0,96
4	Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	25,2	30,6	22,9	10,5	10,9	2,51	1,27

Şekil A: Mobilya tasarımı genel sorular / Figure A: Furniture design general questions

Önemli noktalar (Highlights)

- Mobilya tasarımı / Furniture desing
- Kültürel nitelikler / Cultural qualities
- Özgün Türk mobilyası / Orijinal Turkish murniture

Amaç (Aim): Bu çalışmada; mobilya tasarımı aşamasında tasarımcının tasarımı yaparken içinde bulunduğu toplumsal niteliklerin, kendi kültürel özelliklerinin ve küresel eğilimlerin mobilya tasarımına etkisinin ve özellikle de özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında tanınırlığının araştırılması amaçlanmıştır. / In this study; at the furniture design stage, it is aimed to investigate the impact of the designer's social qualities, his own cultural characteristics and global trends on furniture design, and especially the recognition of original Turkish furniture in the world markets.




Özgünlük (Originality): Toplumların kültürel niteliklerinin mobilya tasarımına etkisi, özgün Türk mobilyasının olup olmadığı, var ise özellikleri, yok ise olması için yapılması gerekenler gibi önemli konular hakkında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olup yapılan bu çalışma ile bu boşluğun doldurulacağı düşünülmektedir. / There is no study in the literature on important issues such as the effect of cultural qualities of societies on furniture design, whether there is original Turkish furniture, if so, its features, and if not, what needs to be done to create it, and it is thought that this gap will be filled with this study.

Bulgular (Results): Tasarımcıların kimliklerinin, toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillendiği, tasarımcıların küresel eğilimleri takip etmeleri gerektiği, mobilyanın çizgisel değerlerinin toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmesi gerektiği belirlenmiştir. / It has been determined that the identities of designers are shaped under the influence of the cultural characteristics of their societies, designers should follow global trends, and the linear values of furniture should be associated with the cultural character of the society.

Sonuç (Conclusion): Özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilinmediği, belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için, kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirmek gerektiği, özgün Türk mobilyasının yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınması gerektiği belirlenmiştir. / It has been determined that authentic Turkish furniture is not known in the world markets, that in order to design furniture that bears the identity characteristics of a particular culture, it is necessary to discover its own values, examine and evaluate its own culture more deeply, and that authentic Turkish furniture must carry local/cultural and global values together.



Mobilya Tasarım Sürecinde Topluların Kültürel Niteliklerinin Etkisi ve Özgün Türk Mobilyasının Tanınırlığının Araştırılması

Önder TOSUN^{1*} , Mustafa ALTUNOK² , İhsan KÜRELİ² , Ali KASAL³ 

¹Ahmet Yesevi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 06350, Altındağ/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 48000, Merkez/MUĞLA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/07/2023
Düzeltilme: 11/09/2023
Kabul: 14/09/2023

Anahtar Kelimeler

Mobilya
Tasarım
Özgün
Kültür
Türk Mobilyası
Tasarımcı

Öz

Bu çalışmada, endüstriyel bir ürün olan mobilyanın tasarlanması sürecinde toplumların kültürel özelliklerinin ve küresel eğilimlerin mobilya tasarımına etkisi ve özgün Türk mobilyasının tanınırlığının araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Ankara ve İstanbul illerinde görev yapmakta olan ilgili akademisyenlerin, mobilya ve iç mekân tasarımı alanı öğretmenlerinin ve bu illerdeki mobilya firmalarında her kademede çalışan temsilcilerinin görüşlerini ortaya koymak hedeflenmiştir. Nicel araştırma tekniği ile yürütülen araştırmada, ilgili çalışma evreninden tesadüfi yöntemle seçilen 726 kişiye konuya ilişkin bir anket uygulanmış, elde edilen sonuçlara ait veriler analiz edilerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerektiği, tasarımcıların kimliklerinin toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillendiği, tasarımcıların küresel eğilimleri takip etmeleri ve onları etkilemeleri gerektiği, özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında tanınırlığının olmadığı, buna göre de belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirmek gerektiği sonucu çıkmıştır. Bu bağlamda, özgün Türk Mobilyasının tanınırlığının artırılması için Türk kültürüne ait motifler, semboller, desenler kullanılarak mobilyalar tasarlanması, bu kapsamda tasarım okulları açılması ve bu konuda projeler yürütülmesi önerilmektedir.

Investigating the Effect of Cultural Characteristics of Societies on the Furniture Design Process and the Recognition of Original Turkish Furniture

Article Info

Research article
Received: 15/07/2023
Revision: 11/09/2023
Accepted: 14/09/2023

Keywords

Furniture
Desing
Original
Culture
Turkish Furniture
Designer

Abstract

In this study, it is aimed to investigate the impact of cultural characteristics of societies and global trends on furniture design and the recognition of original Turkish furniture in the process of designing furniture, which is an industrial product. Within the scope of the study, it was aimed to reveal the opinions of relevant academicians working in Ankara and Istanbul, furniture and interior design field teachers and representatives working at all levels in furniture companies in these provinces. In the research conducted with the quantitative research technique, a survey on the subject was applied to 726 people randomly selected from the relevant study population, and the data of the results were analyzed and evaluated. According to the results of the study, in order to design furniture that bears the identity characteristics of a particular culture, it is necessary to discover its own values and examine its own culture more deeply, designers' identities are shaped under the influence of the cultural qualities of their societies, designers need to follow global trends and influence them, original Turkish furniture is not recognized in world markets, Accordingly, it has been concluded that in order to design furniture that bears the identity characteristics of a particular culture, it is necessary to discover its own values, examine and evaluate its own culture more deeply. In this context, in order to increase the recognition of authentic Turkish Furniture, it is recommended to design furniture using motifs, symbols and patterns belonging to Turkish culture, to open design schools in this context and to carry out projects on this subject.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobilya tarihi, mobilyanın çağlar boyunca geçirdiği aşamaları ve bu aşamalar süresince uğradığı önemli değişiklikleri inceleyen bilim dalıdır. Çünkü mimarlık ile mobilya arasında parça bütün ilişkisi vardır. Bir başka deyişle mobilya, mimarının özellikle iç mimarının bir donatım aracı, bir aksesuarıdır. Bu nedenle mobilyanın çağlar boyunca gelişimi incelenirken onu doğrudan etkileyen kültürel kimliğe de önem verilmelidir [1].

İnsanlar tarih boyunca mobilyayı evlerinde kullanmış, mekân ve mobilyalarına zamanın ruhunu, modasını ve kültürünü yansıtmışlardır. Mobilya tasarımcılarının içinde buldukları kültürün niteliklerine, temel tasarım eleman ve ilkelerine hâkim olmaları ve bu ilkeleri uygun şekilde tasarımlarının sanatsal boyutunda kullanmaları gerekir [2].

Mobilya, yapıların iç düzenini kurmak amacıyla sonradan yerleştirilen ve çeşitli gereksinimlerini karşılayan eşyadır. Mobilyaların görünürdeki kullanım amaçlarıyla oturmak, yemek yemek, yatmak, yazı yazmak, eşya depolamak yoluyla günlük pratik yaşamı kolaylaştırmaktadır [3].

Mobilya tasarım sürecinde yaşanan zamanın, toplumların kültürel özelliklerinin ve küresel eğilimlerin etkisinin olup olmadığı her zaman merak konusu olmuştur. Mobilya tasarlanırken tasarımcının ait olduğu toplumun niteliklerinin, değerlerinin tasarımcı üzerinde etkisi, özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında tanınırlığı, özgün Türk mobilyasının yerel, küresel değerleri taşıyıp taşımadığı ile ilgili görüşlerin ortaya çıkarılması gerekmektedir. Bu görüşün ne kadar doğru olup olmadığı ile ilgili Türk mobilya tasarım ve üretimi ile ilişkili olduğu düşünülen; ilgili akademisyenlerin, mobilya tasarım öğretmenlerin ve mobilya firma temsilcilerinin görüşleri ile ortaya çıkarılmasının daha gerçekçi olabileceği değerlendirilmektedir.

Mobilya tasarımı son yıllarda daha da önem kazanmakta olup insanlar aldıkları mobilyalarda kendi kültürlerinden özellikler olmasını istemektedirler. Mobilya sektöründe faaliyet gösteren özellikle büyük firmalar bünyelerinde tasarım birimleri kurmakta, araştırma geliştirme faaliyetleri yürütmektedirler [4]. Ancak yapılan bu geç kalmış girişimler henüz istenilen düzeyde etkili olamamakta özgün tasarımlar ortaya çıkarılamamaktadır. Yapılan alan araştırmasında bu konunun hak ettiği ölçüde yer bulamadığı görülmüş olup, konuyla ilgili literatür aşağıda verilmiştir.

İrez, kitabında, XIX. yüzyıl Osmanlı saraylarında görülen mobilya üsluplarının zengin örneklerini içeren Dolmabahçe Sarayı, Beylerbeyi Sarayı, Yıldız Sarayı-Şale Köşkü mobilyalarını incelemiş, Türklerin batı mobilyasını ilk defa Tanzimat'la tanıdıklarını, Küçükerman kitabında ise, 1870'li yıllarda mobilya tasarımı ve üretiminin Osmanlı yaşamının doğal bir parçası olduğunu, ithal ürünlerin yanı sıra artık İstanbul'da birçok atelyede ciddi boyutlarda üretim yapıldığını, Yıldız Sarayı'ndaki yeni mekânların tasarım ve mobilyalarıyla yarattığı etkilerin yıllar boyu sürdüğünü belirtmiştir [6].

Arıburun çalışmasında, Dolmabahçe, Beylerbeyi ve Yıldız Saraylarında yaşanan sosyokültürel değişimi, kullanılmaya başlayan Batılı anlamda hareketli mobilyalar, özellikle de yemek mobilyaları üzerinden sorgulamıştır. Çalışma sonucunda Osmanlı Batılılaşmasını sadece son yüzyıla indirgemenin doğru olmayacağı ve etkileşimin iki yönlü olduğunun anlaşılması gerektiği, yemek yeme biçimlerindeki değişim örneğinden yola çıkarak sosyokültürel değişimin sürekli ve farklı girdilerle şekillendiği ortaya konulmuştur [7].

Öztürk, XV. ve XVI. Louis stili mobilya tasarımları ile ilgili tezler, kitaplar, dergiler, makalelerden yararlanarak literatür araştırması olarak yürüttüğü çalışmada, mobilya tasarımlarının üretim yöntemleri ve tasarımı etkileyen kavramlar açısından ele alınarak günümüzdeki örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, günümüzde yapılan üretimlerde; XV. ve XVI. Louis stili mobilya tasarımlarının özelliklerini tam olarak yansıtmayan, daha az maliyete sahip, estetik ve ergonomik olmayan örneklerle rastlandığını, bu stil mobilyaların aslına uygun örneklerle güncel ileri teknolojilerin yardımıyla üretilmesinin yararlı olacağını belirtmiştir [8].

Erdem araştırmasında, mobilya tasarım tarihinin gelişim süreci ve Art Deco dönemindeki tasarım ilkeleri ve gelişim süreci ele alınmıştır. Çalışmanın sonucunda, mobilyaların Art Deco ile gösterişli ve coşkulu tasarımlardan uzaklaşarak, sade formlara ve zarafete geri dönüş ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Art Deco akımının kökeninde geleneksel el sanatları atelyelerinde sade ve zarif üretimlere dayandığı, fakat endüstri Devrimi'nin getirdiği makineleşmeye bağlı olarak seri ve hızlı üretimden etkilendiği bildirilmiştir [9].

Gürleyen araştırmasında, özgün Türk mobilyasının yaratılmasında kullanılabilecek tasarım öğelerinin tarama yöntemi ile elde edilmesi ve bunlardan yararlanarak prototip ürünler tasarlanmasını

amaçlamıştır. Belirlenen tarama evreninde mobilya tasarımına ışık tutacak olan motifler ve sanat eserleri incelenerek derlenmiştir. Seçilen örnek motifler, günümüz modern mobilya çeşitleri üzerine yansıtılmaya çalışılarak, bilgisayar ortamında tasarımlar oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan farklı mobilya tasarımları Siteler ve çıkırcıklar yokuşu bölgesinde hizmet veren mobilya satıcılarının beğenisine sunularak olumlu fikirleri alınmış, özgün çizgileri olan tasarımlardan oluşan ve üretilebilirliği olan Türk mobilyasına ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir [10].

Burdurlu vd. tarafından farklı demografik özellikli mobilya kullanıcılarının klasik sandalyelerle ilgili stil ve renk tercihleri araştırılmıştır. Bu amaçla bir anket hazırlanmış ve hazırlanan anket Ankara'da farklı semtlerinde farklı meslek gruplarından farklı demografik özellikli 400 kişiyle tesadüfi örnekleme ilkelerine göre, yüz-yüze görüşme yoluyla uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, herhangi bir özellik göz önüne alınmadan Duncan Phyfe 1, Queen Anne, Rönesans, Colonial ve Duncan Phyfe 2 stillerinin en çok tercih edildiği; kahverengi, beyaz ve sarı renkler ve bu renklerin tonlarının da en çok tercih edilen renkler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, demografik özelliklere göre stil ve renk tercihlerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir [11].

Abdelrazik çalışmasında, küreselleşmenin anlamı ile kültürel kimlik ve yaratıcılık arasında kültürel bağlantı kurmayı ve bunun mobilya tasarım sürecine etkilerini analiz etmeyi amaçlamıştır. Sonuçta, tarih, dil, din ve geleneklerin kültürü etkilediği, bunun da insanlar üzerinde çeşitli alanlarda olduğu gibi mobilya tasarımında da kişileri, milletleri etkilediği sonucuna varmıştır [12].

Şişman çalışmasında, Ankara ve Kayseri illerindeki döşemeli mobilya üreten işletmelerin üretim teknolojilerine yönelik karşılaştıkları sorunları belirleyerek bunlara çözüm önerileri getirilmesini amaçlamıştır. Bu illerde tesadüfi seçilen 55 işletmede anket uygulanmış ve işletmelerin yaşamış oldukları sorunlar belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, işletmelerin büyüklükleri, hukuki yapıları ve buldukları ilin özellikleri bakımından, işletmelerin karşılaştıkları teknolojik sorunların da değiştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak; işletmelerin yaşamış oldukları teknolojik sorunları en aza indirebilmeleri için yeni teknolojik gelişmeleri yakından takip etmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır [13].

Demirci çalışmasında, toplam 608 işletmeye yüz yüze görüşme tekniği ile anket uygulanmış ve Türkiye Mobilya Endüstrisinin yapısı ve sorunlarını tespit edip çözüm önerileri sunmayı amaçlamıştır. Çalışmanın sonucunda mobilya endüstrisinin en önemli sorununun eğitimli eleman yetersizliği olduğu tespit edilmiştir. Bunu, hammadde, teknoloji ve enerji yetersizliği sorunlarının izlediğini bildirmiştir. Ayrıca, özgün tasarım eksikliği de önemli bir başka sorun olarak ortaya çıkmıştır [14].

Üstüner tarafından yapılan çalışmada, Ankara'da bulunan mobilya ve dekorasyon firmalarının hangi alanlarda çalıştığı ve ne gibi problemlerle karşılaştıklarına yönelik mevcut durumun saptanması ve tespit edilen problemlerin çözümüne katkı sağlayacak önerilerin getirilmesi amaçlanmıştır. Ankara'da tesadüfi olarak seçilen 51 adet işletmeye araştırma anketi uygulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, firmaların temel sorunları; hammadde yetersizliği, hammaddelerde ve üretimde standartların olmaması, teknolojik yeniliklere ulaşamama, tasarımlarda çoğunlukla katalog ve internetteki sitelerde bulunan ürünlerin taklit edilmesi, siparişe bağlı illerde düzenli bir üretim planlamasının yapılamaması, yaratıcı ve üretken elemanların eksikliği ve yetersizliği ve etkili tanıtım için kaynak ayrılabilmesinin saptanmıştır [15].

Türkmen tarafından yapılan çalışmada, İngiltere mobilyasına tarihsel süreç bağlamında değinilmiş ve mevcut durum pazara yön veren tasarımcılar ile yapılan görüşmeler sonucunda ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Araştırmaya dâhil edilen tasarımcıların yanıtları doğrultusunda belirginleşen güncel yaklaşımlar ele alınmıştır. Bu araştırmayı desteklemek amacıyla ayrıca, İngiltere mobilya pazarında yer alan 22 adet firmanın mobilya tasarımları incelenmiş; elde edilen bilgiler ve görüşmelerden elde edilen bulgular doğrultusunda İngiltere pazarı için 3 farklı seri mobilya tasarımı gerçekleştirilmiştir [16].

Toplumların kültürel niteliklerinin mobilya tasarımına etkisi, özgün Türk mobilyasının olup olmadığı, var ise özellikleri, yok ise olması için yapılması gerekenler gibi önemli konular hakkında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olup yapılan bu çalışma ile bu boşluğun doldurulacağı düşünülmektedir. Çalışma ilgili akademisyenlerin, mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmenlerinin ve mobilya firma temsilcilerinin cinsiyet, meslek, eğitim durumları, mezun oldukları bölümler, mesleki kıdemleri, görev yaptıkları il veya ilçe, yaşanan şehirlere göre görüşlerinin farklılaşıp farklılaşmadığının ortaya

çıkartılması için Ankara ve İstanbul'da yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada mobilya tasarımı aşamasında tasarımcının tasarımı yaparken içinde bulunduğu toplumsal özelliklerin kendi kültürel niteliklerinin ve küresel eğilimlerin mobilya tasarımına etkisinin ve özellikle de özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında tanınırlığının araştırılması amaçlanmıştır.

Buna göre nicel ölçek ile yürütülen araştırmanın hipotezi olarak katılımcıların "belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için, kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirmek gerekip gerekmediği, tasarımcıların kimliklerinin her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenip şekillenmediği, tasarımcıların küresel eğilimleri takip edip etmedikleri, özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında bilinip bilinmediği, mobilyanın ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi olup olmadığı, mobilyanın çizgisel değerlerinin toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilip ilişkilendirilemeyeceği, özgün Türk mobilyasının yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşıyıp taşıyamayacağı" ile ilgili görüşleri" birbirinden farklıdır şeklinde belirtilmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Araştırma Yöntemi (Research Method)

Endüstriyel bir ürün olan mobilyanın tasarlanması sürecinde, toplumun kültürel niteliklerinin, küresel eğilimlerin mobilya tasarımına etkisine, özgün Türk mobilyasının Dünya pazarlarında bilinirliğine, özgün Türk mobilyasının yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşıyıp taşıyamamasına ilişkin; katılımcıların görüşleri doğrultusunda betimlemeyi amaçlayan bu araştırma nicel araştırma yöntemi ile yürütülmüştür. Araştırmada veri elde edebilmek üzere araştırmacı tarafından Ankara ve İstanbul illerinde ilgili Üniversitelerin ilgili bölümlerinde görevli akademisyenler, mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmenleri ve mobilya firma temsilcilerinin görüşlerini belirlemek üzere geliştirilen nicel veri toplama aracı kullanılmıştır. Veri toplama aracının uygulanabilmesi için Gazi Üniversitesi Etik Komisyonundan 08.05.2018 tarihli onay alınmıştır.

2.2. Çalışma Grupları ve Örneklem Büyüklüğü (Study Groups and Sample Size)

Araştırma evrenini akademisyenler, öğretmenler ve mobilya firma temsilcileri olmak üzere 3 katılımcı grubu oluşturmaktadır. Araştırma kapsamında geliştirilen ankete; Ankara'da yer alan Hacettepe,

Gazi ve Ortadoğu Teknik Üniversiteleri, İstanbul'da bulunan Marmara, Mimar Sinan Güzel Sanatlar ve Yıldız Teknik Üniversiteleri akademisyenlerinin katılması sağlanmıştır. Katılım sağlayan akademisyenler, 2018-2019 eğitim öğretim yılında Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği, Mimarlık, İç Mimarlık, Sanat Tarihi ve Endüstri Ürünleri Tasarımı bölümlerinde görev yapanlardan tercih edilmiştir. Anketlere ayrıca, 2018-2019 eğitim öğretim yılında, Ankara ve İstanbul illerinde bulunan mesleki ve teknik Anadolu liselerinde görev yapmakta olan mobilya ve iç mekân tasarımı alanı öğretmenleri ile 2016 yılı itibarıyla Ankara ve İstanbul illerinde bulunan mobilya firmalarında çalışan mobilya temsilcilerinin de katılması sağlanmıştır.

YÖK istatistiklerine [17] göre 2018-2019 eğitim öğretim yılında belirtilen Üniversitelerin ilgili bölümlerinde toplam 443 akademisyen görev yapmaktadır. Örgün eğitim istatistikleri, iki ilin İl Milli Eğitim Müdürlüklerinden ve okul yönetimleriyle iletişime geçilerek alınan güncel bilgilere göre 2018-2019 eğitim öğretim yılında belirtilen okullarda toplam 215 mobilya ve iç mekân tasarımı alanı öğretmeni görev yapmaktadır. ORAN Orta Anadolu Kalkınma Ajansı-TR72 Mobilya Sektör Raporu, Haziran 2016'ya [18] göre Ankara ve İstanbul illerinde bulunan mobilya firmalarında çalışan toplam 65695 mobilya firma temsilcisi görev yapmaktadır. Araştırmanın hedef evrenindeki kişilerin sayısının, araştırmacının ulaşamayacağı büyüklükte olması, kaynak maliyeti ve süre gereksiniminin fazla olması nedeniyle evrenden örneklem alma yoluna gidilmiştir.

Ankara ve İstanbul illerindeki toplam 6 farklı Üniversitedeki araştırma kapsamına alınan ilgili bölümlerdeki akademisyenler için her bir Üniversite birer tabaka olarak ele alınmış ve tabakalardaki akademisyen sayıları, tabakaların örneklem büyüklükleri oranında hesaplanmıştır. Ankara ve İstanbul illerindeki mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmenleri için farklı illerin her biri de yine birer tabaka olarak ele alınmış ve tabakalardaki öğretmen sayıları, tabakanın örneklemdeki büyüklükleri oranında hesaplanmıştır. Mobilya firma temsilcileri için de farklı illerin her biri birer tabaka olarak ele alınmış ve tabakalardaki firma çalışan sayıları, tabakanın örneklemdeki büyüklükleri oranında hesaplanmıştır.

Araştırmanın örnekleminde akademisyen, öğretmen ve firma temsilcilerini temsil eden ve örneklem büyüklüğünün hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan Cochran'ın [19] tabakalı örneklemede örneklem büyüklüğü 1 ile hesaplanmaktadır.

$$n = \frac{t^2(PQ)/d^2}{1 + \left(\frac{1}{N}\right)t^2(PQ)/d^2} \quad (1)$$

n = Örneklem Büyüklüğü

N = Evren Büyüklüğü

d = Tolerans düzeyi (0,05)

t = Güven Düzeyinin Çizelge Değeri (t=1,96)

PQ = (0,50)x(0,50)=0,25 maksimum örneklem büyüklüğü için örneklem yüzdesini göstermektedir.

Formülle hesaplamalar yapıldığında araştırmanın evreni olan akademisyenler, öğretmenler ve firma temsilcilerini $\alpha= 0,05$ anlamlılık ve %5 tolerans düzeyinde; belirtilen Üniversitelerde görevli 206 akademisyen, belirtilen illerde görevli 138 mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmeni ve belirtilen

illerde mobilya firmalarında çalışan 382 mobilya firma temsilcisi, olmak üzere asgari 726 kişinin temsil edebileceği varsayılmıştır [20]. Araştırmada evrendeki alt grupların belirlenip bunların evren büyüklüğü içindeki oranlarıyla örneklemde temsil edilmelerini sağlamayı amaçlayan tabakalı örnekleme yöntemi dikkate alınmaktadır [21].

Araştırmanın akademisyen örneklemini oluşturan ilgili Üniversitelerin, ilgili bölümlerdeki Profesör, Doçent, Doktor Öğretim Üyesi, Öğretim Görevlisi, Araştırma Görevlisi unvanlarında görevli olanları kapsamaktadır. Çizelge 1’de bölümler bazında akademik personel sayıları, Çizelge 2’de İstanbul’da bulunan akademisyenler, Çizelge 3’te Ankara’da bulunan akademisyenlerden anket uygulananlara ait sayılar verilmiştir.

Çizelge 1. Bölümler bazında akademik personel sayıları (Number of academic staff by departments)

Bölüm Adı	Kişi S.	Üniversite Adı	Kişi S.	Üniversite Adı	Kişi S.
Ağaçşileri End. Müh.	16	Yıldız Teknik Ü.	121	Gazi Ü.	66
Mimarlık	283	Mimar Sinan GSÜ	136	Hacettepe Ü.	22
İç Mimarlık	49	Marmara Ü.	20	Orta Doğu Teknik Ü.	78
Endüstri Ürünleri Tas.	64	Toplam	277	Toplam	166
Sanat Tarihi	31				
Toplam	443				

Çizelge 2. İstanbul’da bulunan akademisyenlerden anket uygulanan sayılar (Numbers surveyed by academics in Istanbul)

Evrende	İstanbul’da toplam 129 akademisyen
	Yıldız Teknik Üniversitesi’nde; 56 akademisyen
	Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi’nde; 63 akademisyen
	Marmara Üniversitesi’nde; 10 akademisyen

Çizelge 3. Ankara’da bulunan akademisyenlerden nicel anket uygulanacak sayılar (Numbers to be surveyed by academics in Ankara)

Evrende	Ankara’da toplam 77 akademisyen
	Gazi Üniversitesi’nde; 31 akademisyen
	Hacettepe Üniversite’sinde; 10 akademisyen
	Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde; 36 akademisyen

Araştırmanın İç Mekân Tasarımı alanı öğretmenleri evreni hesaplaması için öncelikle, Ankara’da 24 farklı mesleki ve teknik eğitim kurumunda toplam 95 mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmeni bulunduğu belirlenmiştir [22]. İstanbul’da ise 16

farklı mesleki ve teknik eğitim kurumunda toplam 120 mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmeni bulunmaktadır [23]. Çizelge 4’te Ankara ve İstanbul’daki öğretmenlerden nicel anket uygulanan öğretmen sayıları verilmiştir.

Çizelge 4. Ankara ve İstanbul'daki öğretmenlerden nicel anket uygulanan sayılar (Numbers of teachers in Ankara and Istanbul who received a quantitative survey)

Ankara'da	61 Öğretmen
İstanbul'da	77 Öğretmen

Mobilya firma temsilcileri evreninin hesaplanması için öncelikle, Ankara'da 5361 mobilya firmasında 30062 kişi istihdam edildiği tespit edilmiştir. İstanbul'da ise 6458 mobilya firmasında 35633 kişi

istihdam edilmektedir [18]. Çizelge 5'te Ankara ve İstanbul'daki firma temsilcilerinden nicel anket uygulanan sayılar verilmiştir.

Çizelge 5. Ankara ve İstanbul'daki firma temsilcilerinden nicel anket uygulanan sayılar (Quantitative survey numbers from company representatives in Ankara and Istanbul)

Ankara'da	174 firma temsilcisi
İstanbul'da	208 firma temsilcisi

2.3. Veri Toplama Aracının Geliştirilmesi (Development of Data Collection Tool)

Araştırmanın veriler toplayabilmek üzere geliştirilen veri toplama aracı kullanılmıştır. Ankara ve İstanbul illerinde görevli ilgili Üniversitelerin ilgili bölümlerinde görevli akademisyenler, mobilya ve iç mekân tasarımı alan öğretmenleri ve mobilya firmaları temsilcilerinin görüşlerini belirlemek üzere anket formu geliştirilmiştir. Araştırmada verilerin toplanması aşamasında Ankara ve İstanbul illerindeki ilgili Üniversitelere, ilgili Mesleki ve Teknik Anadolu Liselerine ve bu illerdeki özellikle mobilya sanayi bölgeleri olan Ankara'da Siteler sanayi sitesi, İvedik OSB, Akyurt sanayi sitesi ve Hasanoğlan sanayi sitesi, İstanbul'da ise Modoko sanayi sitesi, Masko sanayi sitesi gibi büyük ölçekli mobilya firmalarının bulunduğu mobilya sanayi bölgelerine araştırmacı tarafından bizzat gidilerek veriler toplanmıştır [4].

Veri toplama aracı için önce konuyla ilgili alan incelenmiş; ancak alanda hazırlanması planlanan ölçeğe benzer bir ölçek ya da ankete rastlanmamıştır. Bu noktada verileri toplamak amacıyla orijinal bir ölçek geliştirmek üzere önce konuyla ilgili kavramlar ve alan ayrıntılı bir biçimde taranmıştır. Mobilya tasarımı konusunda, tasarım kavramı, ilkeleri, özgün tasarım kavramı, kültür, toplumun değerleri kavramları araştırılmıştır. Akademisyenler için Üniversitelerdeki ders içerikleri, öğretmenler için mesleki ve teknik Anadolu liselerinde okutulan ders içerikleri MEGEP ders içeriklerinden, mobilya firma temsilcileri için firma standart donatımları, Çalışma ve İş Kanunlarına göre çalışan kişi sayısına göre firmaların büyüklükleri araştırılmıştır.

2.4. Verilerin İstatistiksel Analizi ve Değerlendirilmesi (Statistical Analysis and Evaluation of Data)

Araştırmadan elde edilen veriler SPSS 21.0 (Statistical Package for Social Sciences) Paket Programı ile analiz edilmiştir. Tanımlayıcı istatistikler olarak ortalama, standart sapma ve yüzde dağılımlar verilmiştir. Verilerin normal dağılıma sahip olup olmadığı Kolmogorov-Smirnov testi ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda verilerin normal dağılıma uymadığı görülmüştür. İki parametreden oluşan değişkenlere yönelik karşılaştırmalarda Mann Whitney U test, ikiden fazla parametreden oluşan verilere ilişkin karşılaştırmalarda ise Kruskal Wallis H testi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar %95 ($p < 0.05$) anlamlılık düzeyinde değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde araştırma verileri ile ilgili analizlere yer verilmiş olup ilk olarak ankete katılan kişilerin demografik bilgileri ile ilgili tanıtıcı istatistiklere ve analizlere yer verilmiştir. Bu kapsamda katılımcıların cinsiyetleri, meslekleri, eğitim düzeyleri, bölümleri, mesleki kıdemleri ve görev yaptıkları yer ile ilgili frekans analizleri yer almaktadır. Sonrasında tüm katılımcılara sorulan mobilya tasarımı ile ilgili soruların ortalama ve standart sapmaları hesaplanmış ve bu soruların demografik verilere göre analizi Mann Whitney U ve Kruskal Wallis analizleri ile yapılmıştır. Devamında akademisyenlere, öğretmenlere ve firma temsilcilerine ayrı ayrı sorulan soruların ortalama ve standart sapmaları hesaplanmış ve bu soruların demografik verilere göre analizi Mann

Whitney U ve Kruskal Wallis analizleri ile Katılımcıların demografik verilere ilişkin bulguları yapılmıştır. Çizelge 6'da verilmiştir.

3.1. Demografik Verilere İlişkin Bulgular

(Findings Regarding Demographic Data)

Çizelge 6. Katılımcıların demografik verilere ilişkin bulguları (Participants' findings regarding demographic data)

Katılımcıların		N (Sayı)	%
Cinsiyeti	Kadın	215	29,66
	Erkek	511	70,34
	Toplam	726	100
Mesleği	Akademisyen	206	28,4
	Firma Temsilcisi	380	52,4
	Öğretmen	140	19,2
	Toplam	726	100,0
Eğitimi	Üniversite	294	40,2
	Lisansüstü	249	34,4
	Yüksekokul	108	14,9
	Lise ve altı	75	10,3
	Toplam	726	100,0
Bölümleri	Ağaçşleri Endüstri Mühendisliği	37	5,1
	Mimarlık	88	12,1
	İç Mimarlık	79	10,9
	Sanat Tarihi	11	1,5
	Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	9,6
	Mobilya ve İç Mekân Tasarımı Öğretmeni	148	20,4
	Diğer	293	40,4
	Toplam	726	100,0
Mesleki kıdemi	1-10 yıl	270	37,2
	11-20 yıl	257	35,4
	21 yıl ve üstü	199	27,4
	Toplam	726	100,0
Görev yeri	İl	661	91,0
	İlçe	65	9,0
	Toplam	726	100,0
İli	Ankara	405	55,8
	İstanbul	321	44,2
	Toplam	726	100,0

Katılımcılar arasında erkek katılımcılar ağırlıktadır. Katılımcıların %70,34'ü erkek iken %29,66'sı kadınlardan oluşmaktadır. Katılımcıların arasında firma temsilcisi katılımcılar ağırlıktadır. Katılımcıların %52,4'ü firma temsilcisi, %28,4'ü akademisyen ve %19,2'si öğretmendir. Katılımcıların eğitim durumlarında üniversite mezunları ağırlıktadır. Katılımcılar arasında üniversite mezunlarının oranı %40,15 iken lisansüstü mezunlarının oranı %34,35, yüksekokul mezunlarının oranı %14,9 ve lise mezunlarının oranı %10,3'tür. Katılımcıların bölümleri incelendiğinde katılımcıların %20,4'ü mobilya ve iç mekân tasarımı öğretmenliği bölümünde, %12,1'i mimarlık, %10,9'u iç mimarlık, %9,6'sı endüstri

ürünleri tasarımı, %5,1'i ağaçşleri endüstri mühendisliği ve %1,5'i sanat tarihi bölümündedir. Katılımcıların %40,4'ü diğer bölümlerde olup bu yüzdeyi firma temsilcileri oluşturmaktadır. Katılımcıların mesleki kıdemleri incelendiğinde katılımcıların %37,2'sinin 1-10 yıl arası, %35,4'ünün 11-20 yıl arası ve %27,4'ünün 21 yıl ve üstü mesleki kıdemi olduğu görülmektedir. Katılımcıların %91'i il merkezinde görev yaparken %9'u ilçe merkezinde görev yapmaktadır. Katılımcıların %55,8'i Ankara'da, %44,2'si İstanbul'da görev yapmaktadır (Çizelge 6).

3.2. Mobilya Tasarımı Genel Sorularına İlişkin Bulgular

(Findings on General Questions of Furniture Design)

Tüm katılımcılara mobilya tasarımı ile ilgili 6 soru sorulmuştur. Sorular 5'li Likert tipi (1 Hiç

katılmıyorum, 2 Çok az katılıyorum, 3 Orta derecede katılıyorum, 4 Büyük ölçüde katılıyorum, 5 Tamamen katılıyorum) sorulardır. Sorulara verilen cevapların ortalama ve standart sapmaları ve yüzdeleri Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Mobilya tasarımı genel sorular yüzde dağılımı, ortalama ve standart sapmaları (Furniture design general questions percentage distribution, mean and standard deviations)

Sıra	Genel Sorular	1	2	3	4	5	X	S
		%	%	%	%	%		
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	1,1	2,8	15,4	38,0	42,7	4,18	0,87
2	Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	2,5	9,1	24,0	40,8	23,7	3,74	1,00
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	1,8	4,7	18,0	36,8	38,7	4,06	0,96
4	Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	25,2	30,6	22,9	10,5	10,9	2,51	1,27
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.	2,5	9,5	25,9	41,5	20,7	3,68	0,99
6	Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	3,3	8,3	35,4	30,4	22,6	3,61	1,03
1 Hiç katılmıyorum, 2 Çok az katılıyorum, 3 Orta derecede katılıyorum, 4 Büyük ölçüde katılıyorum, 5 Tamamen katılıyorum. X: ortalama, S: standart sapma								

Katılımcıların büyük çoğunluğu belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerektiğine inanmaktadır. Katılımcıların %80,7'si bu soruya büyük ölçüde veya tamamen katılmıştır. Aynı şekilde katılımcılar tasarımcıların kimliklerinin her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillendiğini düşünmektedir. Katılımcıların %64,5'i bu soruya büyük ölçüde veya tamamen katılmıştır. Katılımcılar tasarımcıların küresel eğilimleri takip etmesi gerektiğini, onlardan etkilenmesi ve etkilemesi gerektiğini de düşünmektedir. Katılımcıların %75,5'i bu soruya büyük ölçüde veya tamamen katılmaktadır. Buna karşın katılımcılar Özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilindiğine katılmamaktadır. Katılımcıların %55,8'i bu soruya hiç katılmamış veya çok az katılmıştır. Katılımcıların %21,4'ü ise

bu soruya büyük ölçüde veya tamamen katılmıştır. Katılımcılar büyük çoğunluğu mobilyanın çizgisel değerlerinin toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmesi gerektiğine inanmaktadır. Katılımcıların %62,2'si bu soruya tamamen veya büyük ölçüde katılmaktadır. Yine katılımcıların büyük çoğunluğu Özgün Türk mobilyasının yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşıması gerektiğine inanmaktadır. Katılımcıların %53'ü bu soruya büyük ölçüde veya tamamen katılmaktadır. Mobilya tasarımı ile ilgili genel soruların normallik analizi yapılmış ve bu soruların normal dağılım göstermedikleri tespit edilmiştir. Yapılan Kolmogorov-Smirnov testine göre tüm sorularda $p < 0,05$ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 8). Bu sonuca göre soruların dağılımı normal değildir.

Çizelge 8. Katılımcıların mobilya tasarımı ile ilgili genel sorularına ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi analizi sonuçları (Kolmogorov-Smirnov test analysis results regarding participants' general questions about furniture design)

Normallik Testleri				
Sıra	Katılımcılara Sorular	Kolmogorov-Smirnov		
		KS Testi	SD	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	0,253	726	0,000
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	0,247	726	0,000
3	Tasarımcı küresel trendleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	0,230	726	0,000
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	0,214	726	0,000
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	0,247	726	0,000
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	0,193	726	0,000

SD: serbestlik derecesi, p: anlamlılık

Mobilya tasarımı ile ilgili genel sorular normal dağılım göstermediği için demografik veriler ile ilgili yapılacak analizlerde parametrik olmayan analizler uygulanmıştır. İlk olarak cinsiyete göre soruların farklılık gösterip göstermediğini tespit

etmek için Mann Whitney U Testi uygulanmıştır. Mann Whitney U Testi parametrik olmayan iki bağımsız grup arasında anlamlı farklılık olup olmadığını tespit etmek için kullanılmaktadır. Mann Whitney U Test sonuçları Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Mobilya tasarımı genel soruların cinsiyete göre Mann Whitney U analizi sonuçları (Mann Whitney U analysis results of furniture design general questions according to gender)

Sıra	Sorular	Cinsiyet	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir	Kadın	215	4,11	0,861	0,065
		Erkek	510	4,22	0,873	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	Kadın	215	3,61	1,007	0,021
		Erkek	510	3,80	0,992	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	Kadın	215	4,05	0,933	0,776
		Erkek	510	4,06	0,966	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	Kadın	215	2,22	1,146	0,000
		Erkek	510	2,63	1,301	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	Kadın	215	3,64	0,951	0,310
		Erkek	510	3,70	0,999	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	Kadın	215	3,43	0,939	0,001
		Erkek	510	3,68	1,055	

Analiz sonuçlarına göre erkek ve kadın katılımcılar arasında 3 soruda anlamlı farklılık vardır. “Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının

kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.” sorusunda erkek katılımcıların ortalaması kadın katılımcılardan yüksek olup erkek katılımcılar bu

soruya daha fazla katılmışlardır. Bu durum “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.”, “Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.” soruları için de geçerlidir. Genel olarak tüm sorularda erkek katılımcıların ortalaması kadın katılımcılardan yüksektir.

Katılımcıların mesleklerine göre sorularda anlamlı farklılık olup olmadığını tespit etmek için Kruskal Wallis testi kullanılacaktır. Kruskal Wallis testi parametrik olmayan 3 veya daha fazla grup arasındaki anlamlı farklılığı tespit etmek için kullanılmaktadır. Kruskal Wallis test sonuçları Çizelge 10’da verilmiştir.

Çizelge 10. Mobilya tasarımı genel soruların mesleğe göre Kruskal Wallis analizi sonuçları (Kruskal Wallis analysis results of furniture design general questions by profession)

Sıra	Sorular	Meslek	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	Akademisyen	206	4,17	0,810	0,541
		Firma Temsilcisi	380	4,22	0,858	
		Öğretmen	139	4,14	0,972	
		Toplam	725	4,19	0,867	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	Akademisyen	206	3,65	0,869	0,077
		Firma Temsilcisi	380	3,74	1,100	
		Öğretmen	139	3,86	0,873	
		Toplam	725	3,74	0,998	
3	Tasarımcı küresel trendleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	Akademisyen	206	4,22	0,732	0,035
		Firma Temsilcisi	380	3,94	1,066	
		Öğretmen	139	4,14	0,889	
		Toplam	725	4,06	0,956	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	Akademisyen	206	1,53	0,622	0,000
		Firma Temsilcisi	380	3,13	1,264	
		Öğretmen	139	2,28	0,993	
		Toplam	725	2,51	1,272	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	Akademisyen	206	3,54	0,870	0,001
		Firma Temsilcisi	380	3,69	1,060	
		Öğretmen	139	3,89	0,890	
		Toplam	725	3,69	0,983	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	Akademisyen	206	3,56	0,934	0,500
		Firma Temsilcisi	380	3,63	1,084	
		Öğretmen	139	3,64	0,985	
		Toplam	725	3,61	1,023	

Kruskal Wallis testi sonuçlarına göre meslek grupları arasında 3 soruda anlamlı farklılık vardır. “Tasarımcı küresel trendleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.” Sorusunda (3.soru) en yüksek ortalama öğretim elemanlarına (4,22) ait olup en düşük ortalama firma temsilcilerine (3,94) aittir. “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda (4.soru) ise akademisyenlerin ortalaması (1,53) diğer meslek gruplarına göre çok düşüktür. Bu soruda en yüksek ortalama firma temsilcilerine aittir (3,13). Buna göre öğretim elemanları özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilinmediğine

inanırken firma temsilcileri dünya pazarında bilindiğine inanmaktadır. “Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda (5.soru) ise en yüksek ortalama öğretmenlere (3,89), en düşük ortalama öğretim elemanlarına (3,54) aittir.

Katılımcıların eğitim durumlarına göre sorularda anlamlı farklılık olup olmadığını tespit etmek için Kruskal Wallis testi kullanılmıştır. Kruskal Wallis test sonuçları Çizelge 11’de verilmiştir.

Çizelge 11. Mobilya tasarımı genel soruların eğitim durumuna göre Kruskal Wallis analizi sonuçları
(Kruskal Wallis analysis results of furniture design general questions according to education level)

Sıra	Sorular	Okul	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	Yüksekokul	108	4,15	0,915	0,683
		Üniversite	291	4,23	0,865	
		Lisansüstü	249	4,16	0,859	
		Lise ve altı	75	4,16	0,871	
		Toplam	723	4,18	0,870	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	Yüksekokul	108	3,74	1,053	0,288
		Üniversite	291	3,80	1,031	
		Lisansüstü	249	3,70	0,889	
		Lise ve altı	75	3,61	1,138	
		Toplam	723	3,74	1,000	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	Yüksekokul	108	3,92	0,987	0,068
		Üniversite	291	4,10	0,991	
		Lisansüstü	249	4,14	0,800	
		Lise ve altı	75	3,80	1,174	
		Toplam	723	4,06	0,956	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	Yüksekokul	108	3,07	1,372	0,000
		Üniversite	291	2,82	1,240	
		Lisansüstü	249	1,73	0,872	
		Lise ve altı	75	3,08	1,148	
		Toplam	723	2,51	1,273	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	Yüksekokul	108	3,55	1,062	0,000
		Üniversite	291	3,88	0,975	
		Lisansüstü	249	3,55	0,888	
		Lise ve altı	75	3,59	1,116	
		Toplam	723	3,68	0,986	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımalıdır.	Yüksekokul	108	3,51	1,098	0,068
		Üniversite	291	3,72	1,002	
		Lisansüstü	249	3,52	0,980	
		Lise ve altı	75	3,60	1,162	
		Toplam	723	3,61	1,029	

Kruskal Wallis testi sonuçlarına göre meslek grupları arasında 2 soruda anlamlı farklılık vardır. “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda (4. soru) ise lisansüstü mezunlarının ortalaması (1,73) diğer eğitim durumu gruplarına göre düşük olup bu soruda en yüksek ortalama lise ve yüksekokul mezunlarına aittir (3,07). Buna göre lisansüstü mezunları özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilinmediğine inanırken lise ve yüksekokul mezunları dünya pazarında bilindiğine inanmaktadır. “Mobilya ürün

olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda (5.soru) ise en yüksek ortalama üniversite mezunlarına (3,88), en düşük ortalama lisansüstü ve yüksekokul mezunlarına aittir. Katılımcıların bölümlerine göre sorularda anlamlı farklılık olup olmadığını tespit etmek için Kruskal Wallis testi kullanılmıştır. Kruskal Wallis test sonuçları Çizelge 12’de verilmiştir.

Çizelge 12. Mobilya tasarımı genel soruların katılımcıların bölümlerine göre Kruskal Wallis analizi sonuçları (Kruskal Wallis analysis results of furniture design general questions according to participants' sections)

Sıra	Sorular	Bölüm	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği	37	4,30	0,909	0,008
		Mimarlık	88	3,90	0,898	
		İç mimarlık	79	4,34	0,696	
		Sanat Tarihi	11	4,55	0,688	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	4,07	0,937	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	4,16	0,962	
		Diğer	293	4,24	0,822	
		Toplam	726	4,18	0,870	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği	37	4,14	0,918	0,000
		Mimarlık	88	3,31	0,914	
		İç Mimarlık	79	3,94	0,979	
		Sanat Tarihi	11	4,00	0,447	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	3,53	1,018	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	3,82	0,938	
		Diğer	293	3,77	1,034	
		Toplam	726	3,74	0,999	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği	37	4,14	0,787	0,116
		Mimarlık	88	3,99	0,864	
		İç Mimarlık	79	4,24	0,895	
		Sanat Tarihi	11	4,55	0,934	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	4,03	0,932	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	4,13	0,890	
		Diğer	293	3,98	1,045	
		Toplam	726	4,06	0,956	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği	37	2,46	1,238	0,000
		Mimarlık	88	1,48	0,773	
		İç Mimarlık	79	2,58	1,116	
		Sanat Tarihi	11	1,45	0,522	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	2,00	1,192	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	2,32	1,025	
		Diğer	293	3,07	1,299	
		Toplam	726	2,51	1,272	

Çizelge 12'nin devamı

5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği	37	3,95	0,911	0,000
		Mimarlık	88	3,31	0,927	
		İç Mimarlık	79	3,86	0,873	
		Sanat Tarihi	11	4,00	0,894	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	3,33	0,944	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	3,86	0,919	
		Diğer	293	3,70	1,036	
		Toplam	726	3,68	0,985	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği	37	4,16	0,986	0,000
		Mimarlık	88	3,14	0,776	
		İç Mimarlık	79	3,80	0,838	
		Sanat Tarihi	11	4,18	0,751	
		Endüstri Ürünleri Tasarımı	70	3,17	1,035	
		Mobilya ve İç mekân Tasarımı Öğretmeni	148	3,66	1,001	
		Diğer	293	3,69	1,084	
		Toplam	726	3,61	1,027	

Kruskal Wallis testi sonuçlarına göre bölümler arasında 5 soruda anlamlı farklılık vardır. “Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için; kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirebilmek gerekir.” sorusunda (1. soru) Sanat Tarihi bölümünden olan katılımcıların ortalaması (4,55) en yüksek, Mimarlık bölümünden katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,90). “Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.” sorusunda (2. soru) ise Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği bölümünden olan katılımcıların ortalaması (4,14) en yüksek, Mimarlık bölümünden katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,31). “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” Sorusunda (4. soru) diğer bölümlerden olan katılımcıların ortalaması (3,07) en yüksek, Sanat Tarihi bölümünden katılımcıların ortalaması en düşüktür (1,45). “Mobilya ürün olarak

dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda (5. soru) Sanat Tarihi bölümünden olan katılımcıların ortalaması (4,00) en yüksek, Mimarlık bölümünden katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,31). “Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.” sorusunda (6. soru) Sanat Tarihi bölümünden olan katılımcıların ortalaması (4,18) en yüksek, Mimarlık bölümünden katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,14). Genel olarak Mimarlık bölümünden olan katılımcıların ortalaması düşüktür. Buna karşın Sanat Tarihi ve Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği bölümlerinden olan katılımcıların ortalamaları yüksektir.

Katılımcıların mesleki kıdemlerine göre sorularda anlamlı farklılık olup olmadığını tespit etmek için Kruskal Wallis testi kullanılmıştır. Kruskal Wallis test sonuçları Çizelge 13'te verilmiştir.

Çizelge 13. Mobilya tasarımı genel soruların katılımcıların mesleki kıdemlerine göre Kruskal Wallis analizi sonuçları (Kruskal Wallis analysis results of furniture design general questions according to the professional seniority of the participants)

Sıra	Sorular	Kıdem	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	1-10 yıl	270	4,06	0,843	0,000
		11-20 yıl	257	4,14	0,899	
		21 yıl ve üzeri	199	4,41	0,829	
		Toplam	726	4,18	0,870	

Çizelge 13'ün devamı

2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	1-10 yıl	270	3,60	1,029	0,019
		11-20 yıl	257	3,80	0,998	
		21 yıl ve üzeri	199	3,85	0,940	
		Toplam	726	3,74	0,999	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	1-10 yıl	270	4,11	0,947	0,197
		11-20 yıl	257	3,97	0,986	
		21 yıl ve üzeri	199	4,10	0,924	
		Toplam	726	4,06	0,956	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	1-10 yıl	270	2,31	1,222	0,002
		11-20 yıl	257	2,70	1,303	
		21 yıl ve üzeri	199	2,55	1,266	
		Toplam	726	2,51	1,272	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	1-10 yıl	270	3,57	0,987	0,003
		11-20 yıl	257	3,65	1,012	
		21 yıl ve üzeri	199	3,87	0,923	
		Toplam	726	3,68	0,985	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.	1-10 yıl	270	3,48	1,015	0,003
		11-20 yıl	257	3,60	1,034	
		21 yıl ve üzeri	199	3,79	1,013	
		Toplam	726	3,61	1,027	

Kruskal Wallis testi sonuçlarına göre mesleki kıdemler arasında 5 soruda anlamlı farklılık vardır. “Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için; kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirebilmek gerekir.” sorusunda (1. soru) 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması (4,41) en yüksek, 1-10 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması en düşüktür (4,06). “Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.” sorusunda (2. soru) 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması (3,85) en yüksek, 1-10 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,60). “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda (4. soru) 11-20 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması (2,70) en yüksek, 1-10 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması en düşüktür (2,31). “Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri

toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda (5. soru) 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması (3,87) en yüksek, 1-10 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,57). “Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşımaktadır.” Sorusunda (6. soru) 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması (3,79) en yüksek, 1-10 yıl meslek kıdemi olan katılımcıların ortalaması en düşüktür (3,48). Genel olarak 1-10 yıl kıdemi olan katılımcıların ortalaması düşüktür. Buna karşın 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalamaları yüksektir.

Soruların katılımcıların görev yaptıkları ile ve yere göre farklılık gösterip göstermediğini tespit etmek için Mann Whitney U Testi uygulanmıştır. Mann Whitney U Test sonuçları Çizelge 14 ve Çizelge 15'te verilmiştir.

Çizelge 14. Mobilya tasarımı genel soruların katılımcıların görev yaptığı yere göre Mann Whitney U analizi sonuçları (Mann Whitney U analysis results of furniture design general questions according to the place where the participants work)

Sıra	Sorular	Merkez	N	X	S	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	İl	661	4,18	0,865	0,596
		İlçe	65	4,22	0,927	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	İl	661	3,74	1,005	0,748
		İlçe	65	3,80	0,939	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	İl	661	4,05	0,946	0,322
		İlçe	65	4,12	1,053	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	İl	661	2,47	1,280	0,003
		İlçe	65	2,91	1,128	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	İl	661	3,68	0,982	0,745
		İlçe	65	3,72	1,023	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınmalıdır.	İl	661	3,60	1,030	0,407
		İlçe	65	3,69	0,999	

Çizelge 15. Mobilya tasarımı genel soruların katılımcıların görev yaptığı ile göre Mann Whitney U analizi sonuçları (Mann Whitney U analysis results of furniture design general questions according to the participants' work)

Sıra	Sorular	İl	N	X	S.	p
1	Belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerekir.	Ankara	405	4,12	0,930	0,061
		İstanbul	321	4,27	0,781	
2	Tasarımcıların kimliklerinin toplumların kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.	Ankara	405	3,65	1,049	0,016
		İstanbul	321	3,86	0,921	
3	Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.	Ankara	405	3,87	1,018	0,000
		İstanbul	321	4,29	0,815	
4	Özgün Türk Mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.	Ankara	405	2,62	1,244	0,002
		İstanbul	321	2,37	1,296	
5	Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakterleriyle ilişkilendirilmelidir.	Ankara	405	3,63	1,003	0,167
		İstanbul	321	3,75	0,959	
6	Özgün Türk Mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınmalıdır.	Ankara	405	3,54	1,061	0,045
		İstanbul	321	3,69	0,979	

Mann Whitney U testi sonuçlarına göre il ve ilçe merkezindeki katılımcılar arasında sadece “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda anlamlı farklılık vardır. Bu soruda ilçe merkezindeki katılımcıların ortalaması daha yüksektir. Ankara ve İstanbul’daki katılımcılar arasında ise 4 soruda anlamlı farklılık vardır. “Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.”,

“Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.” ve “Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınmalıdır.” sorularında İstanbul’daki katılımcıların ortalaması Ankara’daki katılımcılardan yüksektir. Buna karşın “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda Ankara’daki katılımcıların ortalaması daha yüksektir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu araştırmada Ankara ve İstanbul illerinde görev yapmakta olan ilgili Üniversitelerin ilgili bölümlerindeki akademisyenlerin, bu illerdeki mesleki ve teknik Anadolu liselerinde görev yapmakta olan mobilya ve iç mekân tasarımı alanı öğretmenlerinin ve bu illerdeki mobilya firma temsilcilerinin, endüstriyel bir ürün olan mobilyanın, tasarımcısının etkilendiği hususlar ve özgün Türk mobilyasına ilişkin görüşleri ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmaya ilişkin elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sistematik bir sıra ile açıklanmıştır.

Çalışma sonuçlarına göre, katılımcılar belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek gerektiğini belirtmektedir. Katılımcılara göre tasarımcıların kimlikleri toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenmektedir. Katılımcılara göre tasarımcılar küresel eğilimleri takip etmeli ve onları etkilemelidir. Katılımcılara göre özgün Türk mobilyası dünya pazarlarında bilinmemektedir. Katılımcılara göre mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmeli, Türk mobilyasının yerel, kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınması gerekmektedir. Analiz sonuçlarına göre tüm sorularda erkek katılımcıların ortalaması kadın katılımcılardan yüksektir. Katılımcıların mesleklerine göre sorularda ise; “Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.” sorusunda en yüksek ortalama akademisyenlere, en düşük ortalama firma temsilcilerine aittir. “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda ise akademisyenlerin ortalaması diğer meslek gruplarına göre çok düşüktür. Bu soruda en yüksek ortalama firma temsilcilerine aittir. “Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda ise en yüksek ortalama öğretmenlere, en düşük ortalama akademisyenlere aittir. Katılımcıların eğitim durumlarına göre sorularda “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda lisansüstü mezunlarının ortalaması diğer eğitim durumu gruplarına göre düşük olup bu soruda en yüksek ortalama lise ve yüksekokul mezunlarına aittir. Buna göre lisansüstü mezunları özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilinmediğine inanırken lise ve yüksekokul mezunları dünya pazarında bilindiğine inanmaktadır. “Mobilya ürün olarak dizüstü bilgisayar ya da cep telefonu gibi

değildir. Mobilyanın çizgisel değerleri toplumun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.” sorusunda ise en yüksek ortalama üniversite mezunlarına, en düşük ortalama lisansüstü ve yüksekokul mezunlarına aittir. Katılımcıların bölümlerine göre sorularda genel olarak Mimarlık bölümünden olan katılımcıların ortalaması düşüktür. Buna karşın sanat tarihi ve Ağaççileri endüstri mühendisliği bölümlerinden olan katılımcıların ortalamaları yüksektir. Katılımcıların mesleki kıdemlerine göre sorularda genel olarak 1-10 yıl kıdemi olan katılımcıların ortalaması düşüktür. Buna karşın 21 yıl ve üzeri meslek kıdemi olan katılımcıların ortalamaları yüksektir. Soruların katılımcıların görev yaptıkları ile ve yere göre farklılık gösterip göstermediğini tespit sonuçlarına göre il ve ilçe merkezindeki katılımcılar arasında sadece “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda anlamlı farklılık vardır. Bu soruda ilçe merkezindeki katılımcıların ortalaması daha yüksektir. Ankara ve İstanbul’daki katılımcılar arasında ise 4 soruda anlamlı farklılık vardır. “Tasarımcıların kimlikleri her zaman toplumlarının kültürel niteliklerinin etkisinde şekillenir.”, “Tasarımcı küresel eğilimleri takip etmeli, onlardan etkilenmeli ve onları etkileyebilmelidir.” ve “Özgün Türk mobilyası yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınmalıdır.” sorularında İstanbul’daki katılımcıların ortalaması Ankara’daki katılımcılardan yüksektir. Buna karşın “Özgün Türk mobilyası Dünya pazarlarında bilinmektedir.” sorusunda Ankara’daki katılımcıların ortalaması daha yüksektir.

Özgün Türk mobilyasının dünya pazarlarında bilinmediği, belirli bir kültürün kimlik özelliklerini taşıyan mobilya tasarımı için, kendi değerlerini keşfetmek, kendi kültürünü daha derinlemesine incelemek ve değerlendirmek gerektiği, özgün Türk mobilyasının yerel/kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınması gerektiği belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur;

- Özellikle kültürümüzü yansıtan mobilya tasarımının lise eğitimi döneminden başlayarak üniversitelerin ilgili bölümlerinde özellikle ele alınmalı ve sektör firmalarında da tasarımlar uygulanabilmelidir.

- Mobilya tasarımı paydaşlarının Özgün Türk mobilyası konusuna gereken önemi vermeleri ve farkındalıklarının artırılması amacıyla bu tür bilimsel çalışmalar ve analizlerin yapılması gerekmektedir.

- Özgün Türk mobilyasının bilinirliğinin sağlanması amacıyla Devletin ilgili kurumları tarafından bu tip üretim yapan firmalara teşvik kapsamında maddi destek sağlanabilirse firmalar bu tip mobilya üretimine yönelebilirler.

- Özgün Türk mobilyası oluşturmak amacıyla Selçuklular döneminin en karakteristik motiflerinden birbirini kesen altıgen ve yıldızların oluşturduğu geometrik süslemeler gibi Türk motifleri konusunda araştırmalar yapılabilir.

- Geleneksel Osmanlı/Türk mobilyası oluşturulması amacıyla Üniversitelerin ilgili bölümlerinde ve mesleki ve teknik Anadolu liselerinin ilgili alanlarında tasarım dersleri verilmelidir.

- Türkiye mobilya sektöründeki kişilere geleneksel Türk mobilyası oluşturulması amacıyla eğitimler verilebilir.

- Geleneksel Osmanlı/Türk mobilyası ile ilgili kültürümüzü yansıtan tasarımların hazırlanması için tasarım okulları açılabilir. Bu konuda ARGE merkezleri kurulabilir ve özgün tasarımlar geliştirilebilir.

- Özgün Türk mobilyanın çizgisel değerleri Türk toplumunun kültürel karakteriyle ilişkilendirilmelidir.

- Özgün Türk mobilyasının tanınırlığının artırılması amacıyla yapılacak çalışmalarda Türk mobilyasının yerel, kültürel ve küresel değerleri birlikte taşınmasına önem verilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırmanın anketini dolduran değerli katılımcılara ve Gazi Üniversitesi Etik Kuruluna çok teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu çalışma için Gazi Üniversitesi Etik Komisyonu 08.05.2018 tarih ve 04 sayılı toplantısında Araştırma Kod No:2018-195 ile araştırmanın uygulanabilirliği için bilimsel araştırmalar etiği açısından izni bulunmaktadır.

For this study, Gazi University Ethics Commission received permission in terms of scientific research ethics for the applicability of the research with Research Code No: 2018-195 at its meeting dated 08.05.2018 and numbered 04.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu çalışmada tüm yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

All authors contributed equally to this study

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Efe, H. H. (2017), Mobilya Tasarımında Dikkate Alınacak Temel Faktörler ve Temel Tasarım İlkelerinin Uygulanması, 4. Uluslararası Mobilya ve Dekorasyon Kongresi, 19-21 Ekim 2017, Düzce Üniversitesi, Düzce
- [2] Dinçel, K. (1979). *Mobilya Döşemeciliği*, Erkek Teknik Yüksek Öğretmen Okulu Matbaası, 11-90.
- [3] Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi, (1997). Yapı Endüstrisi Merkezi Yayınları, 67-71.
- [4] Tosun, Ö., (2022), II. Abdülhamid Han Dönemi Mobilyalarının Tasarım, Konstrüksiyon Özellikleri ve Günümüzde Üretilebilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-180.
- [5] İrez, F., (1988). *XIX. yüzyıl Osmanlı saray mobilyası*. Atatürk Kültür Merkezi Yayınları, 1-70.
- [6] Küçükerman, Ö., (2007). *Sanayi ve tasarımda bir İmparatorluk iki Saray Topkapı ve Dolmabahçe*. Yapı Kredi Yayınları, 401.
- [7] Arıburun L.N.E., (2012). 19. Yüzyıl Osmanlı Saray Mobilyaları: Batılılaşma Etkisi ve Biçimsel Açından Yemek Kültüründeki Değişim Süreci. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-88.
- [8] Öztürk, Y., (2013). XV. Louis ve XVI. Louis Stili Mobilyalarının Genel Özelliklerinin ve Günümüzdeki Örneklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-80.

- [9] Erdem, T., (2007). Mobilya Tarihine Genel Bakış ve Art Deco. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-102.
- [10] Gürleyen T., (2005). Geleneksel Türk Süsleme Motiflerinin Günümüz Mobilyalarına Uygulanmasını. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-290.
- [11] Burdurlu, E., Usta, İ., Berker, U. Ö. ve Altun, S., (2005). Farklı demografik özellikli mobilya kullanıcılarının klasik sandalye stil ve renk tercihlerinin belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 8(4): 359-367.
- [12] Abdelrazik, A. M., (2015). Cultural Variables and Their impact on the Furniture Desing Process in the Era of Globalization, Doctoral Thesis, Doctor of Philosophy in Desing Braunschweig University of Art, Germany, 2-84.
- [13] Şişman Y. A., (2012). Döşemeli Mobilya Sanayiinde İşletme Ölçeğine göre Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 12-15.
- [14] Demirci, S., (2004). Türkiye Mobilya Endüstrisinin Yapısı Sorunları ve Çözüm Önerileri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-24.
- [15] Üstüner, A. İ., (2010). Ankara'daki Mobilya ve Dekorasyon İşletmelerinin Karşılaştıkları Sorunlar ve Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-113
- [16] Türkmen Ö., (2014). Mobilya İhracatında Kültürel Farklılıkların Mobilya Tasarımına Etkisi: İngiltere Pazarı İçin Örnek Bir Mobilya Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-151.
- [17] İnternet: Web 1. <https://istatistik.yok.gov.tr>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2019.
- [18] Mobilya Sektörü Haziran Raporu, (2016). Ankara: ORAN Orta Anadolu Kalkınma Ajansı Yayınları, 1-5.
- [19] Cochran W. (1962). *Sampling techiques*. New York: John Willey & Sons Publishing, 14-15.
- [20] Anderson, G., (1990). *Fundamentals of educational research*. London: the farmer press, 15-16.
- [21] Büyüköztürk, Ş., (2014). *Bilimsel araştırma yöntemleri*. Pegem Akademi Yayıncılık, 17-24.
- [22] İnternet: Web 2. <http://www.meb.gov.tr/baglantilar/okullar/index.php?ILKODU=6>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2018.
- [23] İnternet: Web 3. <http://www.meb.gov.tr/baglantilar/okullar/index.php?ILKO DU=34>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2018.

Method Development for Sustainable Product and Service Design Strategy: Polymer Products with Shell Structures

Mustafa CANBULAT^{1*} , Habip Akın HACIMUSALAR² , Mine POYRAZ³ 

¹Bilecik Seyh Edebali University, Institute of Graduate Programs, Department of Industrial Sustainability - MD, Bilecik, Turkey

²Istanbul Technical University, Institute of Graduate Programs, Department of Automotive - MD, İstanbul, Turkey

³Bilecik Seyh Edebali University, Faculty of Fine Arts and Design, Department of Ceramic and Glass, Bilecik, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/08/2023
Revision: 15/08/2023
Accepted: 30/08/2023

Keywords

Industrial Design
Sustainability
Polymers
Shell Structure

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/08/2023
Düzeltilme: 15/08/2023
Kabul: 30/08/2023

Anahtar Kelimeler

Endüstriyel Tasarım
Sürdürülebilirlik
Polimerler
Kabuk Strüktür

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Mechanical strength relationships were investigated through the analysis results by applying different mechanical connection points and different forces to the monophasic and three-phase electric meters with two different geometric ratios. / İki farklı geometrik orana sahip monofaz ve trifaz elektrik sayacına farklı mekanik bağlantı noktaları ve farklı kuvvetler uygulanarak analiz sonuçları üzerinden mekanik dayanım ilişkileri araştırılmıştır.

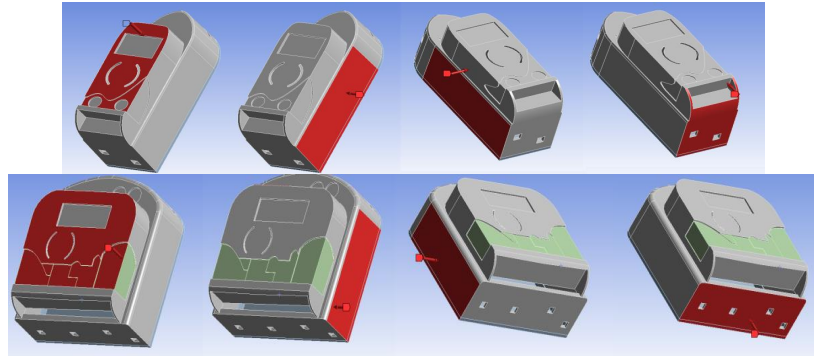


Figure A: Exerted forces for monophasic and three-phase electricity meters / Şekil A: Monofaz ve trifaz elektrik sayacı için uygulanan kuvvetler

Highlights (Önemli noktalar)

- CAD models are created in STEP format for products with different geometries. / Farklı geometrideki ürünlere STEP formatında CAD modeli oluşturulmuştur.
- Four different connection points were applied to the product in two different geometries to prove the hypothesis in every aspect. / Hipotezi her yönüyle kanıtlayacak iki farklı geometride ürüne dörder farklı bağlantı noktası uygulanmıştır.
- Stress, strain and strain analysis for each option were performed through the ANSYS software. / Her seçeneğe ait gerilim, gerinim ve şekil değiştirme analizleri ANSYS programı üzerinden yapılmıştır.

Aim (Amaç): It is aimed at developing a sustainable design method to minimize time and resource losses arising from incompatibilities in industrial design and engineering design processes. / Endüstriyel tasarım ve mühendislik tasarımı süreçlerindeki uyumsuzluklardan yola çıkılarak oluşan zaman ve kaynak kayıplarının minimize edilmesi için bir sürdürülebilir tasarım yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Sustainable design method based on mechanical strength was developed. / Mekanik dayanımdan yola çıkılan sürdürülebilir tasarım yöntemi geliştirilmiştir.

Results (Bulgular): Considering the geometric ratio difference in the three axes, it has been observed that each polymer part has its own unique connection point to show higher strength. / Üç ekseninde geometrik oran farkı da göz önünde bulundurularak her polimer parçanın daha yüksek mukavemet göstermesi için kendine özgü birleşme noktası olduğu görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): It has been observed that if the mechanical connection points are made correctly in polymer products, the mechanical strength will increase. With this method, which will contribute to the sustainable design literature, carbon emissions in service processes will be directly affected due to resource consumption. / Polimer ürünlerde mekanik bağlantı noktalarının doğru yapılması durumunda mekanik dayanımın artacağı görülmüştür. Sürdürülebilir tasarım literatürüne katkı yapacak bu yöntem ile hizmet süreçlerindeki karbon emisyonu kaynak tüketiminden ötürü doğrudan etkilenecektir.



Method Development for Sustainable Product and Service Design Strategy: Polymer Products with Shell Structures

Mustafa CANBULAT^{1*} , Habip Akın HACIMUSALAR² , Mine POYRAZ³ 

¹Bilecik Seyh Edebali University, Institute of Graduate Programs, Department of Industrial Sustainability - MD, Bilecik, Turkey

²Istanbul Technical University, Institute of Graduate Programs, Department of Automotive - MD, İstanbul, Turkey

³Bilecik Seyh Edebali University, Faculty of Fine Arts and Design, Department of Ceramic and Glass, Bilecik, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/08/2023
Revision: 15/08/2023
Accepted: 30/08/2023

Keywords

Industrial Design
Sustainability
Polymers
Shell Structure

Abstract

Sustainability in industrial design aims to provide a better world for future generations by reducing the energy and resource consumption used in the design of products or services. After the industrial design is completed, the products are transformed into a form that will take their place in our lives through the engineering design process. However, during this process, the features that industrial design focuses on may be lost or damaged. This situation reveals the importance of sustainable design strategies by creating various economic and time losses. In order to minimize the aforementioned problems, changes were made to the mechanical design of the products whose industrial design was carried out by an engineering company. It is aimed to strengthen the mechanical strength of the form with changes that do not affect the outer form. Four options were created for each of the two electricity meter models, the structures of which are shell structures and the products to be produced with polymer materials, which differ in size and three-axis ratios, and mechanical strength was analyzed with engineering analysis programs. With the method in the study, it has been revealed that the problem can be solved without the need to make radical changes due to strength in the industrial designs of product groups with similar structures. Thus, a method has been developed within the framework of sustainable product and service design strategies, and it is thought that this method will increase efficiency in the business model and cause less energy and resource consumption.

Sürdürülebilir Ürün ve Hizmet Tasarımı Stratejisi için Yöntem Geliştirme: Kabuk Strüktüre Sahip Polimer Ürünler

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/08/2023
Düzeltilme: 15/08/2023
Kabul: 30/08/2023

Anahtar Kelimeler

Endüstriyel Tasarım
Sürdürülebilirlik
Polimerler
Kabuk Strüktür

Öz

Endüstriyel tasarımda sürdürülebilirlik, ürünlerin veya hizmetlerin tasarlanması sürecinde kullanılan enerjinin ve kaynakların azaltılarak verimli kullanılması ile gelecek nesillere daha iyi bir dünya bırakmayı içermektedir. Ürünler, endüstriyel tasarım gerçekleştirildikten sonra mühendislik tasarımı süreci ile birlikte hayatımızdaki yerlerini alacak forma dönüştürülmektedir. Ancak bu süreç zarfında endüstriyel tasarımın odaklandığı özellikler yitirebilmekte veya zarar görebilmektedir. Bu durum çeşitli ekonomik ve zaman kayıplarını oluşturarak sürdürülebilir tasarım stratejilerinin önemini ortaya çıkarmaktadır. Söz konusu problemlerin en aza indirgenebilmesi için özel bir mühendislik şirketi ile endüstriyel tasarımı gerçekleştirilen ürünler üzerinden mekanik tasarımda değişiklikler yapılmıştır. Dış forma etki etmeyen değişiklikler ile formun mekanik mukavemetinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Strüktürleri kabuk strüktür olan, polimer malzeme ile üretilecek ürünlerin ölçü ve üç eksene göre oranlarının farklı olduğu iki elektrik sayacı modeli üzerinden dörder opsiyon oluşturulmuş, mühendislik analizi programları ile mekanik mukavemet analiz edilmiştir. Çalışmadaki yöntem ile benzer strüktüre sahip ürün gruplarının endüstriyel tasarımlarında mukavemet sebebi köklü değişikliklere gidilmesine gerek olmadan da sorunun çözülebileceği ortaya konmuştur. Böylece sürdürülebilir ürün ve hizmet tasarımı stratejileri çerçevesinde bir yöntem geliştirilmiş, söz konusu yöntem ile iş modelinde verimin artırılarak daha az enerji ve kaynak tüketilmesine sebep olması düşünülmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Within the framework of industrial design, the concept of sustainable design has been developed with many design strategies, and these design strategies are directly related to providing a better world/environment that will not harm future generations [1]. Because the environmental and social activities experienced in the 1970s and 1980s revealed how important the concept of sustainability is. According to these sentences, the basic philosophy of the concept of sustainability is to provide a sustainable world for future generations. Industrial design is one of the product development processes that can directly affect many steps, such as product design, material selection and conformity to production methods, designs that create efficient resource use and service efficiency within the framework of the product life cycle, modular features, and packaging design of the product [2,3]. However, it should not be forgotten that in many design works, the industrial designers fulfill the material and production method within the constraints given to them. Creating the concept of sustainability with these constraints is directly dependent on the industrial plant where the work is done. If industrial designers follow a sustainable product and service design strategy, the product they will design will have more impact on the business model [4]. This situation is explained by steps such as the product being designed, reducing the product variety in the market by eliminating many products (using variety), reducing the waste in the service phase by turning to digital drawings instead of paper and similar drawing tools or increasing efficiency directly in the service phase [5]. In this article, it is aimed to increase efficiency in the business model within the framework of sustainable product and service design and to reduce the resources to be spent on the creation of the service.

An industrial product is a product produced by industrial production techniques. Industrial design designs the relationship between the consumer and the producer of such products [6]. One of the most important limitations in the design of industrial products is structure. Structures are a structural feature that generally determines the mechanical properties, production methods, and form properties of the product. These structural features are generally examined in 8 types in the industrial design discipline. These are; shell structures, solid structures, frames, membranes, plates, cages, tensile structures, and mixed structures [7]. Many of the products seen in daily life consist of shell structures. The reason for this situation is the easy formability

in shell structure applications, especially in the design of the polymer material, and good results that can be obtained in production. In addition, it is a very suitable structure type economically [8,9].

Polymers are the name given to the more complex material that is formed by the combination of monomer molecules formed by organic or inorganic elements under a certain force. The structure formed by the combination of "n" monomers is called a polymer. When polymers are classified according to their internal structures, they are divided into three: thermoplastics, thermosets, and elastomers. While thermoplastics are polymers that can be formed with heat, such materials can be formed by reheating. Thermosets are materials that become rigid when formed by heat. Re-cycling is very problematic at today's level of technological development and it's an area where R&D studies continue for thermosets. Elastomers are materials that include both elastic and viscosity properties. They are heavily strengthened against plastic deformation [10,11]. The most common example in today's world is rubber. Materials called polymers in today's industry are often thermoplastics. ABS, the material whose chemical name is Acrylonitrile Butadiene Styrene, is one of the most common thermoplastics. When heat is transferred during production and the mechanical (density: 1,000-1,200 kg/m³, tensile strength: 28-55 MPa) and thermal performance of the product (resistivity: 3.3 x10²¹ - 30 x10²¹ μohm.cm, specific heat: 1,400-1,900 J/kg.oC, t-conductivity: 0.19-0.34 W/m/k) that will emerge after it can be formed in this process [12]. According to those specifications, it can be said that thermoplastics are mostly used polymers for shell structure because of lower heat resistance and easy formability. The characteristic features of the elements in the chemical structures of the polymers make it possible to create custom polymers by combining them with various chemical processes, and this shows that the polymer industry is still an area suitable for research and development. The variety and flexibility of products with different strengths result from each other, including the products of different companies that produce ABS material, which can also be found under the same name. If the designed part allows, one of the most suitable production methods for polymers is injection molding. When there is a restriction to use polymer materials in an industrial design project with a plastic injection molding method, one of the first structure types to be looked at is the shell structure. However, if the volume of the furnace in which the part will be produced is smaller than the part, choosing a shell structure can also create an economic disadvantage with its production method

[13]. Therefore, the choice of structure is a very important design step. In order to use minimum energy and get maximum efficiency in the glass transition process, polymers are expected to reach a certain viscosity by heating. The viscosity values should also be chosen in serious relationship with the production method of the polymers [14]. With this viscosity, the temperature is reduced while the mold is fully filled, the product solidifies and becomes a ready-made product with the expected mechanical and thermal properties. In general terms, lower viscosity means a higher flow rate for filling the shell.

Industrial products with shell structure, which is the focus of the study, are monophasic and three-phase electricity meters. The studies were created as a result of mutual data exchange with the R&D department of an engineering company. Academically, it is planned that the data will benefit those who will conduct new studies in this sector, and it is aimed to contribute to the sustainable product and service design literature globally as new methods for increasing the mechanical strength in product designs. In order to fulfill these goals, detailed 3-dimensional analysis of monophasic and three-phase electricity meters formed from the shell structure have been made and studies have been created on how to increase the mechanical strength without changing the outer form. Steps are taken to increase mechanical strength; It was thought that the changes to be made due to their size, wall thickness, and morphological differences should be different for monophasic and three-phase electricity meters.

In the literature, it is seen that various studies within the scope of engineering design improvements are made due to both sustainability and economic advantages [15,16]. However, with this study, it has been shown that a joint improvement is possible without damaging each other's industrial design and engineering design processes. This is a step that will make the process more sustainable within the framework of the sustainable product and service design strategy. Technically, it is known that the products will consist of two parts as male and female parts, it is thought that the joint points can be used to support the general structural strength [17]. However, according to the hypothesis established due to the differences in the surface area on which the forces will be applied, it has been thought that the monophasic and three-phase products will have different joint points. In the case of a mismatch between the thoughts and analysis results, analysis sugar, their use remains very limited, and generally, it is not possible to proceed from model-making to

types were increased up to four options, and optimum results were searched.

As a result of the analysis made according to the hypothesis, it was seen that separate steps should be taken for monophasic and three-phase. The joint points of the products have been determined for male and female parts, and the thickness and area sizes of the contact surface areas of the parts are specified. The hypothesis of the study constitutes a universal result, a study that can be applied by businesses and academic people with the application of the desired steps in polymer products with shell structure and obtaining positive results has been revealed. Since it has been proven that more efficient results can be obtained with the use of less resources in terms of sustainable product and service design, it has been understood that the concepts of a green world and a green future can be supported by such sustainability activities (to the stages of the formation of the service) in the presence of rational data.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

In order to make the analysis in the study, the product designs were designed with computer-aided design (CAD), which is numerical-based design software [18,19]. Along with the design of the models, the desired analyzes were applied through the Ansys software. Since the numerical operations are performed for each mesh on the model in computer analysis, it is much more effective and efficient than on-paper operations. In this context, it can be said that the study is directly related to industrial design and engineering design processes (computer-aided design and computer-aided manufacturing) [20].

In the definitions made for the analysis software, the material is selected as ABS. The use of this material is widely available in the global market due to its easy formability and decent mechanical performance values. The fact that it is a petrochemical product also raises questions about the sustainability of the product [21]. The requirement to mix new raw materials at each recycling stage, due to their mechanical and thermal properties that weaken with each recycling stage, also shows the weakness of sustainability in recycled materials. Since there are mechanical and thermal performance problems in thermoplastics produced directly from natural materials such as

the next stage (prototype stage). Therefore, it is foreseen that the technological development in

material technologies will continue. And it is focused on decreasing resource consumption in services and operations for sustainable movements.

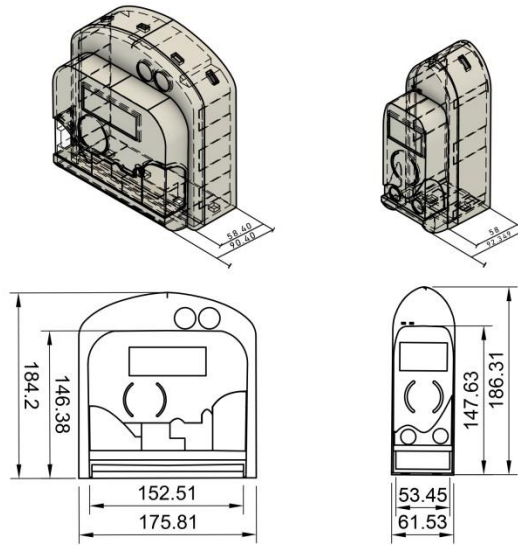


Figure 1. General dimensions of three-phase and monophasic electricity meter products, wall thickness 3 mm (Trifaz ve monofaz elektrik sayacı ürünlerine ait genel ölçüler, et kalınlığı 3 mm)

The designed products' visuals and dimensions are given in Figure 1. At this point, studies were created on the general characteristics of the given product. The main male and female joint parts of the products will be created by the calculation of the center of gravity, so the center of gravity formula has been used for this operation.

Center of gravity calculations for the functional geometry in accordance to mass distribution [22],

$$m = \rho \cdot V$$

m: mass of the object, rho: density, V: volume of the object

$$cg \cdot W = g \cdot \iiint i \cdot \rho(x,y,z) dx dy dz$$

cg: center of gravity, W: total weight of the object, g: gravitational constant, i: distance for reference line

Stress and strain analyses were performed because numerically based strength analyses were required to understand the accuracy of the hypothesis. According to the theoretical background of this subject, strain is a measure of the body's distortion, while stress is related to the strength of the material from which it is built. Because many of the formulas and design rules stated in engineering codes are based on engineering principles, a solid understanding of the fundamentals of this subject is

critical for the design of any machine or structure [23].

Surface loads and body force can both be applied to a body. Concentrated forces are surface loads that act on a small area of contact, whereas distributed loadings act over a broader surface area of the body. A body force is developed when one body exerts force on another's body without direct physical contact between the bodies.

A body's equilibrium requires a balance of forces to prevent it from translating or accelerating along a straight or curved path, as well as a balance of moments to keep it from rotating. The equations of equilibrium are used to express these circumstances mathematically:

$$\sum F = 0 \tag{1}$$

$$\sum M_o = 0 \tag{2}$$

The sum of all forces operating on the body is represented by F, and the sum of the moments of all forces acting on any point O on or off the body is represented by Mo.

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \tag{3}$$

$$\left(\sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad \sum M_z = 0 \right) \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (6)$$

Stress is defined as force per unit area within materials that arise from externally applied forces, uneven heating, or permanent deformation and that permits an accurate description and prediction of elastic, plastic, and fluid behavior.

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (N/M}^2\text{)} \quad (5)$$

F: Force (N), A: Area (m²)

Applied stress can be of two types: these are tensile stress and compressive stress. Tensile stress is the force applied per unit area, increasing a body's length (or area). Objects under tensile stress becomes thinner and longer. Compressive stress is the force applied per unit area, which decreases the length (or area) of a body. The object under compressive stress becomes thicker and shorter.

Strain is the amount of deformation experienced by the body in the direction of force applied, divided by the initial dimensions of the body. Expressed as elongation and original length, that makes it a unitless property.

Strain: ϵ , Change in Length: Δl (m), Original Length: L (m)

Strain can be of two types: these are tensile strain and compressive strain. Tensile strain is the change in the length (or area) of a body due to the application of tensile stress. Compressive Strain is the change in the length (or area) of a body due to the application of compressive strain.

About the Stress-Strain Curve, once the stress and strain data from the test are known, then the results can be plotted to produce a curve called the stress–strain diagram. This diagram is very useful since it applies to a specimen of material made of any size. To obtain a stress-strain diagram, eq. (5) & (6) are given on the -x and -y axis. In addition to these equations, stress can be observed via Hooke's law.

$$\sigma = E \epsilon \quad (7)$$

E: Modulus of Elasticity / Young's Modulus (GPa)

The Stress & Strain diagram varies due to the material type such as ductile and brittle materials. Any material that can be subjected to large strains before it fractures is called a ductile material. Materials that exhibit little or no yielding before failure are referred to as brittle materials.

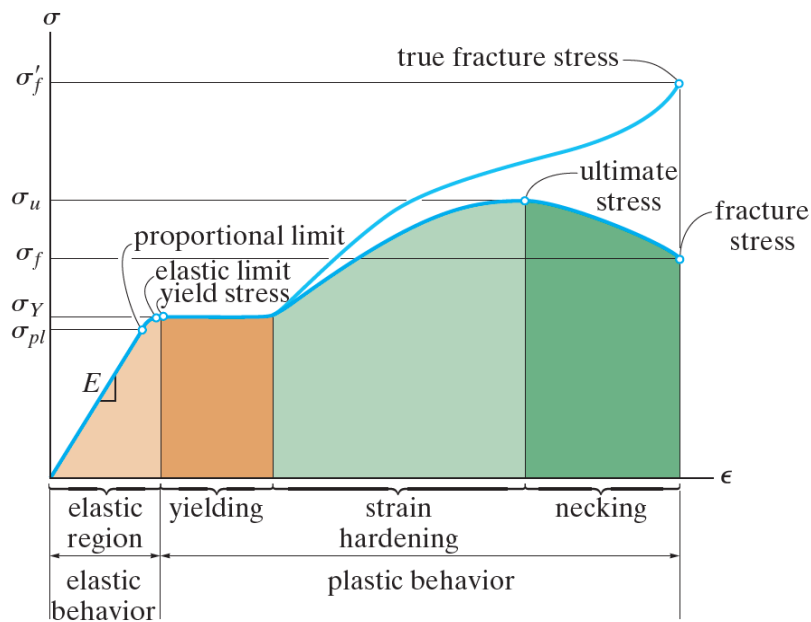


Figure 2. Conventional and true stress–strain diagram for ductile material (Sünek malzemeler için geleneksel ve gerçek gerilim-gerinim diyagramı) [23]

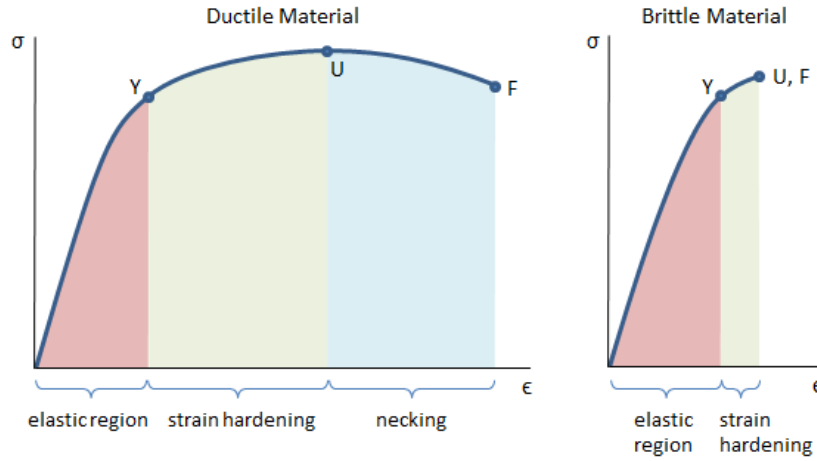


Figure 3. Comparison between ductile and brittle Stress & Strain diagram (Sünek ve kırılğan malzemeler için gerilme-gerinim diyagramının karşılaştırılması) [24]

Analysis background for existing study; the study validation proceeded by examining its total deflection, total stress, and total strain analysis. To have an accurate and meaningful result, Von Mises's total stress & strain analyses are referred. Studies are held via Ansys V22.1.

Before proceeding to analysis results, Von-Mises expressions are given. In the light of theoretical and numerical analysis, the best-resulting electricity meter design will be determined and the study will be completed by finding the true steps to increase mechanical strength without changing the outer form.

Analyses background for existing study; while designing a product, Von Mises stress to be a safe haven. An engineer can use this information to say that his design will fail if the highest value of Von-Mises stress created in the material is greater than the material's strength. In most circumstances, it works well, especially when the material is ductile. One of the easiest ways to check when a material fails is a simple tension test. Here the material is pulled from both ends. When the material reaches the yield point (for ductile material) the material can be considered as failed. The simple tension test is a unidirectional test. A simple tension test is represented in Figure 2. In addition, the ductile and brittle materials' transition graphs are shown in Figure 3.

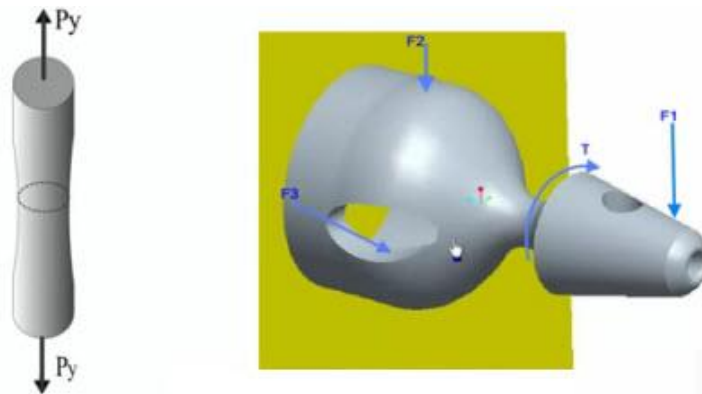


Figure 4. A simple tension test and a real-life loading condition (Basit bir gerilme testi ve gerçek hayat yükleme koşulu) [25]

Now consider the situation in the second part of Figure 2; an actual engineering problem with a complex loading condition. In such complex situations, different approaches are needed. To examine such complexities, a failure theory called 'normal stress theory' is used. Many years of engineering experience has shown that normal

stress theory doesn't work in most cases. The most preferred failure theory used in industry is 'Von-Mises stress'. The distortion energy failure theory gives rise to the concept of Von Mises stress. The failure theory of distortion energy compares two types of energies: the first is distortion energy in the real world and the second is distortion energy

in theory. At the point of failure, distortion energy in a basic tension situation. Failure happens when the distortion energy in the current case is greater than the distortion energy in a simple tension scenario at the point of failure, according to this idea. A simple tension test visual is given in Figure 4.

Distortion energy required per unit volume, u_d for a general 3-dimensional case is given in terms of principal stress values as:

$$u_d = \frac{1 + \nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (8)$$

$$u_{d,sim} = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_y^2 \quad (9)$$

If eq. (8) and (9) are combined and energy failure theory is written;

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq \sigma_y \quad (10)$$

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} = \sigma_y \quad (11)$$

So, failure criterion becomes;

$$\sigma_y \geq \sigma_v \quad (12)$$

3. RESULTS OF ANALYSES AND DISCUSSION (ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA)

As indicated in the study, various processes were applied in order to increase the mechanical strength of the product without changing the outer form. According to this, the first step was created to fit the male and female parts together from the center of gravity. By extending the length of the male part until it encounters any obstacle in the inner part, it was expected to determine the optimum value, and analyses were created accordingly. The minimum male part length was accepted as 4 mm, which is the thickness value of the product in that region, and continued. With this step, the part is prevented from becoming weaker than necessary. Moreover, the maximum value of the inner length is determined as 10 mm for the male part. The reason for this situation is that the part starts to contact with other parts. These processes showed that a value between 4 and 10 mm male part length is optimum. However, this process is an approach based on a gravity-centered splitting point.

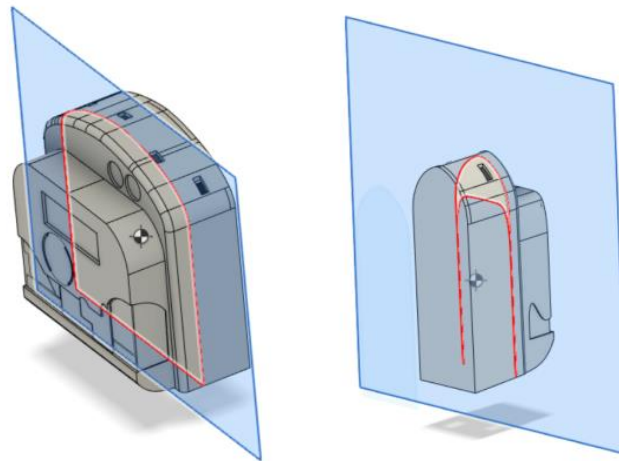


Figure 5. Center of gravity for three-phase and monophase electricity meters (Trifaz ve monofaz elektrik sayaçları için ağırlık merkezleri)

In the second hypothesis, the plate on the point where the product is fixed is cut to become a joining point for the male and female parts. According to this situation, the internal mechanical parts are positioned on the base plate to prevent the product from disintegrating against lateral forces. The products' visuals are given in Figure 5, showing the center of gravity from CAD. Between the lengths of

4 and 10 mm, the optimum length of the male part was considered as a constraint. It was determined according to the hypothesis that the optimum joining points should be different due to the surface areas, product weights, differences in the center of gravity, and different ratios of the products on the three axes. Accordingly, the results of the analyses also matched the hypothesis.

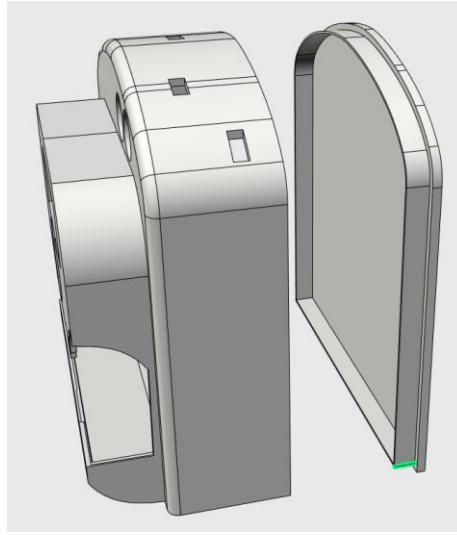


Figure 6. Splitting three-phase electricity meter from lower portion, length of male part shown as green line (Trifaz elektrik sayacının arka bağlantı yüzey noktasından ayrılması, erkek parça uzunluğu yeşil çizgi ile gösterilmektedir)

To examine the suitable design, 4 studies were held for both three-phase and monophase electricity meter products according to deformation, stress, and strain analyses. These studies are compared with respect to Total Deformation, Von Mises Stress & Von Mises Strain Analyses. These 4 types of parts are;

For Monophase Electricity Meters:

- 10 mm Inner Contact at Lower Portion
- 4 mm Inner Contact at Lower Portion
- 4 mm Inner Contact at Center of Gravity
- 10 mm Inner Contact at Center of Gravity

For Three-phase Electricity Meters:

- 10 mm Inner Contact at Lower Portion
- 4 mm Inner Contact at Lower Portion
- 4 mm Inner Contact at Center of Gravity
- 10 mm Inner Contact at Center of Gravity

The lower portion is described as shown in Figure 6. To examine a suitable proposal, four surfaces for each electricity meters are expressed to a certain force, and one face is fixed. The figure below represents the faces and exerted force. This force is:

- 100N vertical compression on front surface
- 200N vertical compression on side surfaces
- 500N vertical compression on bottom surface

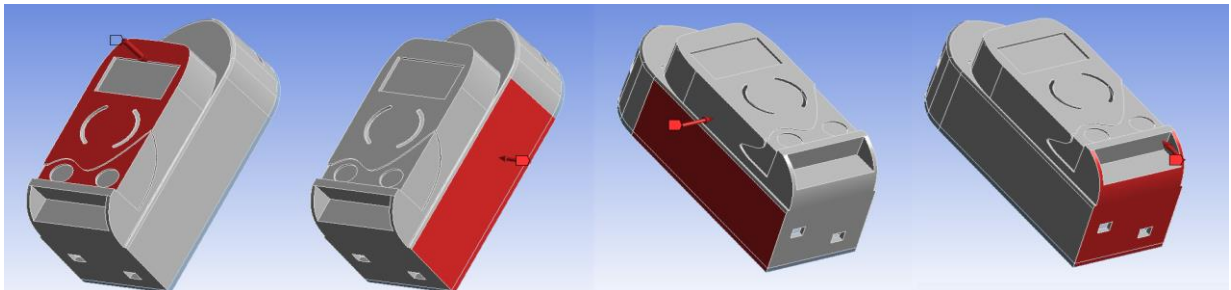


Figure 7. Monophase exerted forces (Monofaza uygulanan kuvvetler)

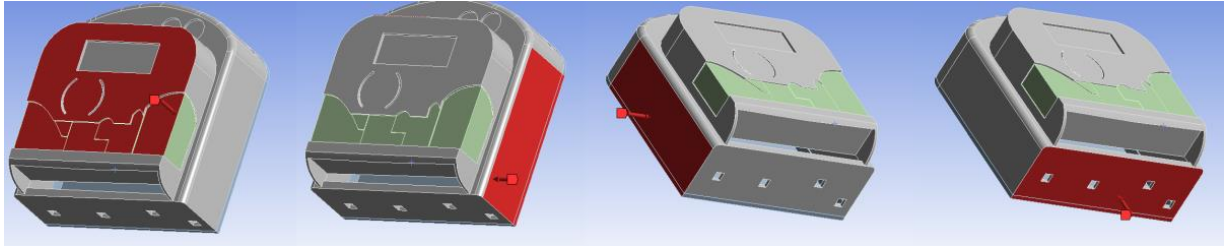


Figure 8. Three-phase exerted forces (Trifaza uygulanan kuvvetler)

Figure 7 and Figure 8 represent the exerted forces of monophase and three-phase products. According to the analysis results; the total deformation, total stress, and total strain figures of the monophase electricity meter are given here. The same study

analysis has been created for a three-phase electricity meter, too.

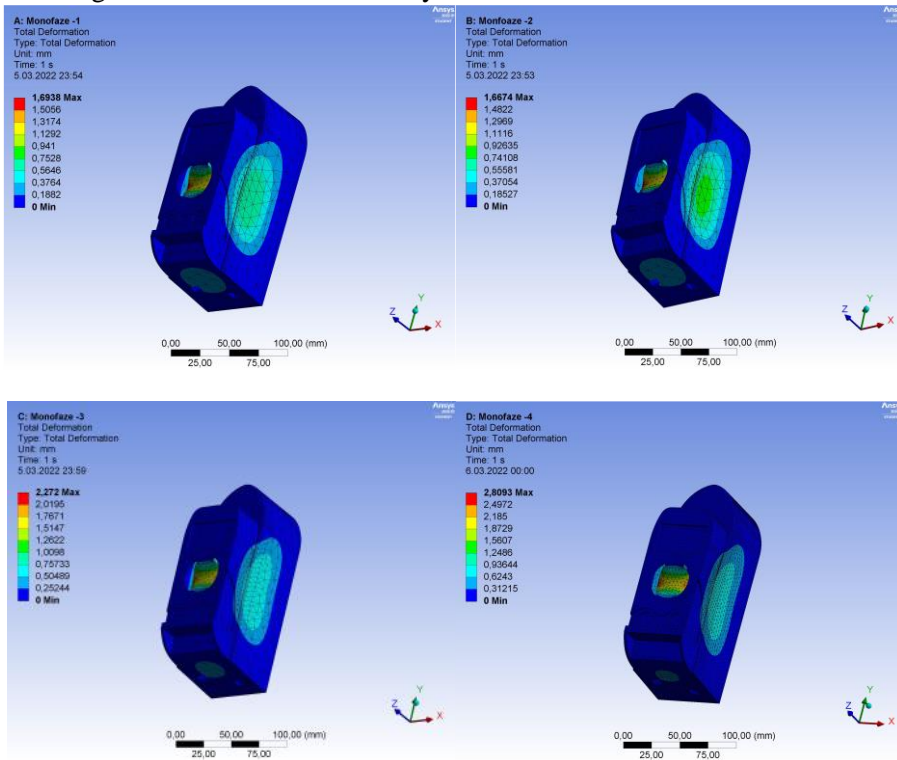


Figure 9. Total deformation analyses for monophase (Monofaz için toplam yer değiştirme analizi)

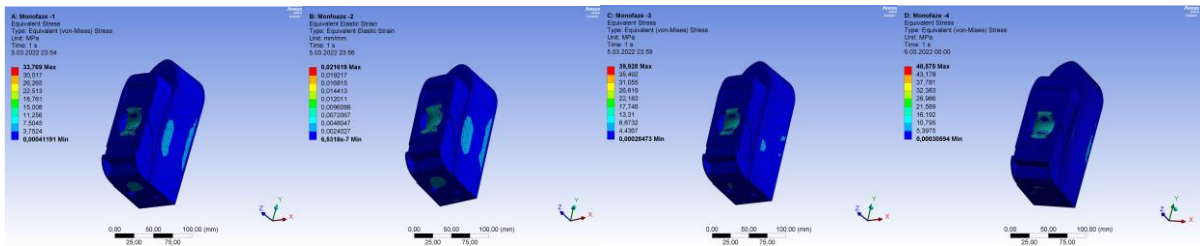


Figure 10. Total stress analyses for monophase (Monofaz için toplam stres analizleri)

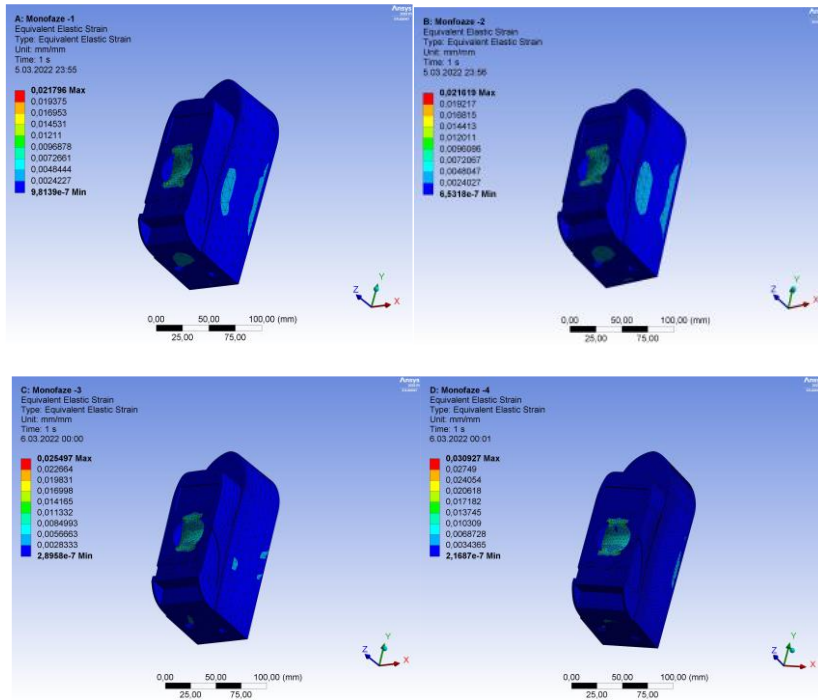


Figure 11. Total strain analyses for monophasic (Monofaz için toplam gerinim analizi)

Total deformation analyses resulted as shown in Figure 9 for the monophasic product. In addition, the visuals that belong to total stress for monophasic are given in Figure 10. Total strain analyses were made according to four steps that are shown in Figure 11.

These three types of analyses are also made for three-phase product. Detailed analysis results are given in Table 1 and Table 2 for maximum values of total deformation, total stress, and total strain.

Table 1. Monophasic Results as Maximum (Monofaz için maksimum sonuçlar)

Monophasic Electric Meter	Monophase -1	Monophase -2	Monophase -3	Monophase -4
Total Deformation (mm)	1,6938	1,6674	2,272	2,8093
Total Stress (MPa)	33,796	33,487	39,928	48,575
Total Strain	0,021796	0,021619	0,025497	0,030927

Table 2. Three-phase Results as Maximum (Trifaz için maksimum sonuçlar)

Three-phase Electric Meter	Three-phase -1	Three-phase -2	Three-phase -3	Three-phase -4
Total Deformation (mm)	3,9737	4,4377	3,0481	3,1115
Total Stress (MPa)	25,615	28,047	19,444	20,814
Total Strain	0,0017678	0,019356	0,013853	0,01558

By referring to Table 1, it can be stated that a suitable design for the monophasic electricity meter would be Monophasic-2, which has 10 mm of contact surface in the lower portion. This statement is done by considering maximum analysis properties and picking the lowest data. Such a statement can be made by referring to Table 2 in terms of the three-phase electricity meter. Three-phase-3 would be the most suitable design that has a 4mm contact point at the center of gravity.

The difference between monophasic and three-phase models is expected to occur due to geometry differences. Since the three-phase's overall geometry is larger than the monophasic, exerted force showed its effects accordingly. So, having 2 different designs in the industry would be the most effective solution in terms of engineering aspects. If cost design singularity is taken into account, a suitable solution would be design-3 in terms of a common contact point idea. Since two different molding and tooling studies will take place for these 2 types of electricity meters, design 2 for monophasic and design 3 for three-phase is expected to be the most overall effective solution.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

According to the study, it has been seen that it is possible to increase the mechanical strength of products without interfering with the outer form during the engineering design processes. However, it has been observed that one of the most important factors to be considered in the application of the processes are the proportions of the parts in three axes. According to this ratio and the location of the center of gravity, including the weight to be carried by the product, suitable joining points should be determined. Business and individual designers who want to reduce energy and resource use by applying a sustainable product and service design strategy can use this study. For those who will apply to the study independently within the scope of business or academic studies, the steps that they should follow in their own studies according to the results of the study are:

- First of all, the industrial design of the product must include a shell structure and consist of thermoplastic material because of easy formability in the injection molding production method.
- Then the weights to be carried by the product should be determined. Accordingly, when an

actively working product is positioned, it should be determined where it will not be exposed to stress and impacts. For analysis, these regions should be defined as a fixed region and no stress should be applied.

In the first step, separation from the center of gravity should be performed in order to determine the points where the product will be combined as male and female parts and to determine the features that it will perform optimally. Optimum values should be searched by extending from the thickness data in the center of gravity of the product to the point where the extension of the male part will be prevented. In the second step, the floor, which is fixed in such a way that it is not smaller than the plate thickness value at the connection point of the product, should be separated from the body as a single plate. The maximum and minimum male part lengths determined in the first step should be accepted in this field, and optimum values should be searched with analyses. However, it should not be forgotten that the plane selection at the joint points of the female and male parts should be made parallel to the plane on which the product is fixed. Thus, a successful method has been established that will minimize the need for modifications to the outer form. This will directly reduce the consumption of energy and resources during the process of service.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

We would like to thank the R&D and engineering services of Rudis Forschung&Entwicklung GmbH.

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)

Mustafa CANBULAT: He designed the main products of article and he has researched on sustainable design strategies.

Ürün tasarımlarını gerçekleştirmiş ve sürdürülebilir tasarım stratejileri üzerine araştırmalar yapmıştır.

Habip Akın HACIMUSALAR: He analyzed numerical based stresses, strains and deformations of parts.

Parçaların gerilim, gerinim ve şekil değiştirmelerini sayısal tabanlı programlarda analiz etmiştir.

Mine POYRAZ: She has researched the main design literature and sustainable needs.

Konu kapsamındaki tasarım literatürü ve sürdürülebilir ihtiyaçlar üzerine araştırmalar yapmıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Gupta, S., Dangayach, G. S., Singh, A.K. (2015). Key determinants of sustainable product design and manufacturing. *Procedia CIRP*, 26 (2015), 99-102.
- [2] Bhamra, T., Lofthouse, V. (2007). *Design for Sustainability: A Practical Approach*. Gower Publishing Limited, United Kingdom, 23-40.
- [3] Xia, W. (2011). Study on PLM-based industrial design processes. *Proceedings Of The 8th International Conference On Innovation And Management*, 2011, Japan, 714-718.
- [4] Chen, C. W. (2018). Guidance on the conceptual design of sustainable product-service systems. *MDPI, Sustainability* 2018, 10(7), 2452.
- [5] Baldassarre, B., Keskin, D., Diehl, J. C., Bocken, N., Calabretta, G. (2020). Implementing sustainable design theory in business practice: A call to action. *Journal of Cleaner Production*, 273 (2020), 123113.
- [6] Oygür, I. (2006). Endüstriyel tasarımcı-kullanıcı ilişkisinin Türkiye bağlamında incelenmesi. Master's thesis, İstanbul Technical University, Science Engineering And Technology Institute, İstanbul.
- [7] Ertaş, D. G., Bayazıt, N. (2009). Endüstri ürünleri tasarımında strüktür. Doctoral thesis, İstanbul Technical University, Science Engineering And Technology Institute, İstanbul.
- [8] Groover, M. P. (2019). *Modern İmalatın Prensipleri 4th ed.* (M. Yurdakul, Y. T. İç, Çev.). Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 167-171.
- [9] Oladele, I. O., Olajide, J. L., Amujede, M. (2016). Wear resistance and mechanical behaviour of epoxy/mollusk shell biocomposites developed for structural applications. *Tribology in Industry*, 38 (3), 347-360.
- [10] Harper, C. A., Petrie, E. M. (2003). *Plastics Materials And Processes*, Wiley, USA. 1-75.
- [11] Crawford, R.J., Martin, P.J. (1998). *Plastics Engineering*, Butterworth-Heinemann, UK, 15-85.
- [12] Ashby, M. (2021). *Material Property Data for Engineering Materials*. Department of Engineering, University of Cambridge. <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-2/material-property-data-for-engineering-materials-BOKENGEN21.pdf>, (15.08.2023).
- [13] Şık, A. (2020). Endüstriyel tasarım ve üretim. *Mühendis ve Makina, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği*, 2020 (1), 32-35.
- [14] Novakova-Marcincinova, L., Novak-Marcincin, J. (2013). Verification of Mechanical Properties of ABS Materials used in FDM Rapid Prototyping Technology. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 8 (2).
- [15] Cross, N. (2021). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design 5th ed.* Wiley, USA, 1-224.
- [16] Dumont, G., Pontonnier, C., Wang, Z. (2014). VES: Virtual Reality based on interactive mechanical simulation for design improvement. *ASME-ACIER (Advances In Computers And Information In Engineering Research)*, 2014 (1), 3-25.
- [17] Albers, A., Alink, T., Matthiesen S., Thau, S. (2008). Support of system analyses and improvement in industrial design through the contact & channel model. *International Design Conference - DESIGN 2008*, 2008, Dubrovnik, Croatia, 245-252.
- [18] Das, A. K. (2004). Cad and rapid prototyping as an alternative of conventional design studio. *International Engineering and Product Design Education Conference*, 2004, Delft, Netherlands, 1-7.
- [19] Saaksvuori, A., Immonen, A. (2008). *Product Lifecycle Management 3rd ed.* Springer Berlin, Germany, 1-52.

[20] Sharma, P., Pathak, K., Sharma, B. K. (2014). Role of Cad/Cam in Designing, Developing and Manufacturing of New Products. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 3 (6), 146-148.

[21] Colorado, H.A., Velásquez, E.I.G., Monteiro, S.N. (2020). Sustainability Of Additive Manufacturing: The Circular Economy Of Materials And Environmental Perspectives. Journal of Materials Research and Technology, 2020; 9(4), 8221-8234.

[22] Center of Gravity – cg. Glenn Research Center, NASA, <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/>, (15.04.2023).

[23] Hibbeler, R. C. (2003). Mechanics of materials 5th ed. Pearson Education, Upper Saddle River, N.J, USA.

[24] Mechanical Properties of Materials. MechaniCalc, <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials>, (14.04.2023).

[25] Mathew, S. (2012). What is von mises stress. LESICS, The Physics Behind Engineering, <https://www.lesics.com/what-is-von-mises-stress.html>, (1.04.2023).

Recycling of Spent LFP Batteries

Gizem AVCI¹ , Alp ÖZDEMİR^{1*} 

¹Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 26555, Eskişehir, Turkey

Article Info

Review article
Received: 25/07/2023
Revision: 03/10/2023
Accepted: 27/10/2023

Keywords

Lithium-Ion Batteries
Lithium Iron Phosphate
Batteries
Lithium Recovery
Waste Battery Recycling

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 25/07/2023
Düzeltilme: 03/10/2023
Kabul: 27/10/2023

Anahtar Kelimeler

Lityum-İyon Bataryalar
Lityum Demir Fosfat
Bataryalar
Lityum Geri Kazanımı
Atık Batarya Geri
Dönüşümü

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, current steps, and procedures for LFP battery recycling are given as a graphic summary below. / Bu çalışmada, LFP batarya geri dönüşümü için mevcut adımlar ve süreçler aşağıda grafik özet olarak verilmiştir.

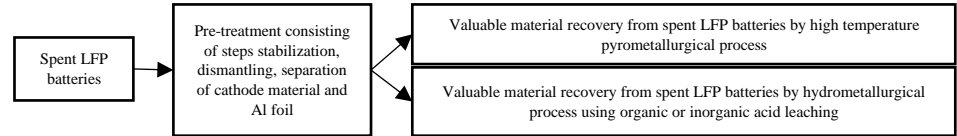


Figure A: Steps and procedures for spent LFP battery recycling flow chart / Şekil A: Atık LFP batarya geri dönüşüm akış şeması için adımlar ve süreçler

Highlights (Önemli noktalar)

- Selective recovery of valuable metals from spent LFP batteries is examined. / Atık LFP bataryalardan değerli metallerin seçici olarak geri kazanımı incelenmiştir.
- Certain recycling technologies of LFP batteries were investigated. / LFP bataryalarının çeşitli geri dönüşüm teknolojileri araştırılmıştır.

Aim (Amaç): It is aimed to examine the recovering valuable materials from spent LFP batteries by different recycling methods. Our aim here is provide information about recycling technologies in the literature, compare the results and evaluate the environmental effects of recycling processes. / Atık LFP bataryalardan farklı geri dönüşüm yöntemleri ile değerli malzemelerin geri kazanımının incelenmesi amaçlanmıştır. Buradaki amacımız literatürdeki geri dönüşüm teknolojileri hakkında bilgi vermek, sonuçları karşılaştırmak ve geri kazanım süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirmektir.

Originality (Özgünlük): Spent LFP batteries are first pre-treated and then the valuable materials in the batteries are recovered by applying pyrometallurgical or hydrometallurgical methods. The study explains how and with which methods these processes are performed and is supported by the literature. / Atık LFP bataryalar ilk olarak ön-ışlemden geçirilir ve daha sonra bataryalardaki değerli malzemeler pirometalurjik veya hidrometalurjik yöntemle geri kazanılır. Çalışma, bu işlemlerin nasıl ve hangi yöntemlerle gerçekleştirildiğini açıklamakta ve literatürle desteklenmektedir.

Results (Bulgular): When the methods were analyzed, it was found that the pyrometallurgical recycling are not suitable for the recycling of spent LFP batteries. Generally, recovery methods consisting of a pre-treatment step and hydrometallurgy of separated active electrode materials by inorganic or organic acid leaching are adaptable to LFP chemistry. / Yöntemler analiz edildiğinde, pirometalurjik geri dönüşümün atık LFP bataryaların geri dönüşümü için uygun olmadığı görülmüştür. Genel olarak, bir ön-ışlem aşaması ve ayrılmış aktif elektrot malzemelerinin inorganik veya organik asit liçi ile hidrometalurjisinden oluşan geri kazanım yöntemleri LFP kimyasına uyarlanabilir.

Conclusion (Sonuç): The current review article reports the recycling problems of spent LFP batteries, the need to extract the valuable metals and possible procedures for battery recycling. Due to the low content of precious and costly metals, the cost-effectiveness of the methods and their benefits are a significant barrier to LFP recycling. Recovering Li, the most important element in LIB production, by hydrometallurgical method and reusing it for production may provide an opportunity to make waste LFP recycling economical. In addition, the environmental hazards caused by waste LFPs should be considered, appropriate recycling strategies should be developed, and processes should be evaluated according to Circular Economy principles. / Bu derleme makalesi, atık LFP bataryaların geri dönüşüm sorunlarını, değerli metallerin ayrılması ihtiyacını ve batarya geri dönüşümü için olası prosedürleri rapor etmektedir. LIB üretiminde en önemli element olan Li'nin hidrometalurjik yöntemle geri kazanılması ve üretim için yeniden kullanılması, atık LFP geri dönüşümünü ekonomik hale getirmek için bir fırsat sağlayabilir. Ayrıca, atık LFP'lerin neden olduğu çevresel tehlikeler göz önünde bulundurulmalı, uygun geri dönüşüm stratejileri geliştirilmeli ve süreçler Döngüsel Ekonomi ilkelerine göre değerlendirilmelidir.



Recycling of Spent LFP Batteries

Gizem AVCI¹ , Alp ÖZDEMİR^{1*}

¹Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 26555, Eskişehir, Turkey

Article Info

Review article
Received: 25/07/2023
Revision: 03/10/2023
Accepted: 27/10/2023

Keywords

Lithium-Ion Batteries
Lithium Iron Phosphate
Batteries
Lithium Recovery
Waste Battery Recycling

Abstract

In recent years, recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries (LIBs) has become important because of their high potential for environmental impacts and inability to use metallic resources sustainably. The amount of spent lithium iron phosphate (LFP) batteries is increasing daily as the use of LFP batteries from different LIBs types has become widespread due to low cost and high-security advantages. Accordingly, recovering valuable metals in spent LFP batteries is very important as most manufacturing and automotive companies are moving toward LFP materials. Spent LFP batteries have received less attention due to the small number of valuable metals they contain, although spent battery recycling methods have improved the economy, the environment, and human health. Developing economical Li recovery technologies is crucial for the long-term growth and benefits of the electric vehicle and spent LFP battery industries. The current review article reports the problems related to the recycling process of batteries, the need to extract valuable metals and possible procedures for battery recycling. Methods such as mechanical pre-treatment of cells, and hydrometallurgical process of the active cathode material appear to be the most efficient method option for spent LFP battery recycling. In addition, recovery of components and metals from active materials after discharge methods, safe removal, and pre-treatment is predominantly carried out by hydrometallurgical methods. The need for further scaling up of these technologies and the main challenges are presented and discussed here. It is believed the conducted review would be helpful in understanding the overall spent LFP battery recycling approach.

Atık LFP Bataryaların Geri Dönüşümü

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 25/07/2023
Düzeltilme: 03/10/2023
Kabul: 27/10/2023

Anahtar Kelimeler

Lityum-İyon Bataryalar
Lityum Demir Fosfat
Bataryalar
Lityum Geri Kazanımı
Atık Batarya Geri
Dönüşümü

Öz

Son yıllarda, atık lityum iyon bataryalardan (LIB'lerden) değerli metallerin geri kazanımı, yüksek çevresel etki potansiyelleri ve metalik kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanılamaması nedeniyle önemli hale gelmiştir. Düşük maliyet ve yüksek güvenlik avantajları nedeniyle farklı LIB türlerinden biri olan lityum demir fosfat (LFP) bataryalarının kullanımı artmakta ve bununla birlikte atık LFP bataryaların oluşum miktarı da her geçen gün artmaktadır. Buna bağlı olarak, atık LFP bataryalardaki değerli metallerin geri kazanılması, üretim ve otomotiv şirketlerinin çoğu LFP malzemelerine yöneldiği için çok önemlidir. Atık LFP bataryalar, içerdikleri az sayıda değerli metal nedeniyle daha az ilgi görmüştür, ancak atık batarya geri dönüşüm yöntemleri ekonomi, çevre ve insan sağlığını iyileştirmiştir. Ekonomik lityum (Li) geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi, elektrikli araç ve atık LFP batarya endüstrilerinin uzun vadeli büyümesi ve faydaları için çok önemlidir. Mevcut derleme makalesi, bataryaların geri dönüşüm süreciyle ilgili sorunları, değerli metallerin çıkarılması ihtiyacını ve batarya geri dönüşümü için olası yöntemleri irdelemektedir. Hücrelerin mekanik ön arıtımı, aktif katot malzemesinin hidrometalurjik işlemi gibi yöntemler, atık LFP batarya geri dönüşümü için en verimli yöntem seçeneği olarak görülmektedir. Buna ek olarak, deşarj yöntemlerinden sonra aktif malzemelerden bileşenlerin ve metallerin geri kazanılması, güvenli bir şekilde uzaklaştırılması ve ön işlemden geçirilmesi ağırlıklı olarak hidrometalurjik yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu teknolojilerin daha fazla ölçeklendirilmesi ihtiyacı ve temel zorluklar bu çalışmada sunulmakta ve tartışılmaktadır. Yapılan incelemenin, atık LFP batarya geri dönüşüm süreçlerinin anlaşılmasına yardımcı olacağına inanılmaktadır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde ileri teknolojiye olan ilgi ve teknolojik süreçlerin güvenilirliğindeki artış enerjiye olan talebin artmasına sebep olmuştur. Küresel ekonomi,

fosil yakıtların öngörülenden daha hızlı bir şekilde tükenmesine sebep olan teknolojik süreçlere bağlıdır. Bu durum, çevreye salınan sera gazları ile sonuçlanmış olup insan sağlığını tehlikeye atarak

olumsuz iklim koşullarına sebebiyet vermiştir. Küresel ısınma gibi önemli bir sorun haline gelmiş iklim değişikliği etkilerini sınırlayabilmek ve fosil yakıtların neden olduğu sera gazlarından kurtulabilmek için enerji sektöründe önemli değişiklikler yapılması gerekmektedir [1]. Küresel ısınmanın oluşturduğu tehdidi azaltmak amacıyla birçok ülke güneş, rüzgâr ve su gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmakta olup bu kaynaklardan elektrik üretiminin, gelecekte küresel sıfır karbonlu enerjinin baskın kaynağı haline geleceği beklenmektedir [2]. Yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımı ve uygulama kolaylığının yanı sıra bu kaynakların etkin kullanılmayacağı zamanlarda belirli süre boyunca enerji depolamak amacıyla pil gibi elektrokimyasal enerji depolama cihazı uygun bir seçenek olarak kabul edilmektedir [3]. Şarj edilebilir piller olarak hem taşınabilir hem de sabit depolama dahil üzere elektrokimyasal enerji depolama sistemleri çeşitli uygulamalar için en verimli uygulamalar olarak kullanılmaktadır [4]. Taşınabilir elektronik cihazların şarj edilebilir pilleri, kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit, lityum-iyon bataryalar olarak sınıflandırılmakta olup spesifik enerjileri ve spesifik güçleri zaman geçtikçe önemli ölçüde artmaktadır [5]. Lityum iyon bataryaların (LIB'lerin) taşınabilir cihazlarda, elektrik şebekelerinde ve ulaşımda kullanılmasının devamlı olarak artmasıyla, bu bataryalara gün geçtikçe daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Bu bataryaların özellikle elektrikli araçlardaki kullanımı çevre dostu olmaları nedeniyle yüksek fosil yakıt kullanımlarını kontrol etmek için mükemmel bir alternatif olarak görülmektedir.

LIB'ler, birincil katot ve elektrolit bileşeni olarak lityum (Li) içeren çeşitli kimyalardan oluşan bir pil kategorisidir [7]. Öte yandan, sahip oldukları yüksek voltaj, yüksek enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, yüksek şarj verimliliği, yüksek ve düşük sıcaklıklarda kararlılığı, hızlı şarj/deşarj oranları, yüksek çalışma performansları ve çevresel anlamda gösterdikleri düşük toksisite gibi avantajlarla, kurşun-asit ve diğer pillere göre gelişmiş ve yaygın kullanılan enerji depolama kaynakları olarak kullanılmaktadır [8-11]. Mevcutta kullanılan ticari LIB'ler yapısındaki katot bileşenine göre; lityum kobalt oksit (LiCoO_2 , LCO), lityum nikel kobalt alüminyum oksit, ($\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Al}_c\text{O}_2$, NCA, $a+b+c=1$), lityum nikel kobalt manganez oksit, $\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Mn}_c\text{O}_2$, NCM, $a+b+c=1$), lityum manganez oksit, (LiMn_2O_4 , LMO) ve lityum demir

fosfat, (LiFePO_4 , LFP) olmak üzere beş tipte sınıflandırılmakta olup LFP ve NCM bataryaları, günümüz küresel elektrik araç endüstrisinde kullanılan en yaygın bataryalardır [10,12,13].

LIB'ler anot (negatif aktif anot elektrot), katot (pozitif aktif katot elektrot), sıvı elektrolit ve ayırıcı olmak üzere başlıca dört ana bileşenden oluşmakta ve elektrotlar, genellikle alüminyum (Al) ve bakır (Cu) folyo olan akım toplayıcı üzerine yerleştirilmektedir. Bataryaların şarj edilmesi esnasında katottan ayrılan Li iyonları, iyonik elektrolit tarafından anoda interkalasyona taşınmakta vedeşarj sırasında geri dönmektedir [14]. Aktif bir tabaka olan katot, Al folyonun her iki yüzüne yapıştırılan malzeme karışımından oluşur. Tipik aktif malzemeler, metal oksit tozu (nikel (Ni), manganez (Mn), kobalt (Co), demir (Fe), Li, vb.), poliviniliden florür (PVDF) bağlayıcı ve asetilen siyahı/karbon siyahı içerir [15]. Tablo 1'de elektrikli araç batarya paketlerinin malzeme listesi yer almaktadır.

Anot, esas olarak grafit, asetilen siyahı ve organik bağlayıcıdan oluşan bir aktif malzeme macunu ile kaplanmış bir Cu folyodan oluşur [17,18]. Anot ve katot malzemeleri, aralarında iyonik geçişe izin vermek için tipik olarak elektrolit tuzu ile karıştırılır. Tuz ve organik solvent, sıvı elektrolitlerin iki ana bileşenidir [8]. Elektrolitte kullanılan lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6), lityum perklorat, lityum hekzafloroarsenat ve lityum tetrafloroborat (LiBF_4) tuzlarından LiPF_6 , termal kararlılığı ve toksik olmaması nedeniyle en yaygın kullanılanıdır [19]. Organik çözücü oluşturmak için propilen karbonat (PC), etilen karbonat (EC) ve düşük viskoziteye sahip doğrusal karbonatlar, yani dietil karbonat ve dimetil karbonat (DMC) kullanılır. LIB'lerin kullanım ömrünü ve güvenliğini artırmak için viniliden karbonat gibi elektrolit katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Yalıtkan bir malzeme olarak ayırıcı, hem elektrotlar arasında doğrudan teması ve kısa devreyi önlemek hem de sıvı elektrolit için bir iyonik iletim kanalı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Gözenekli poliolefin membranlar, sahip oldukları tam performans, güvenlik ve ekonomik avantajlarından dolayı sıvı elektrolitten oluşan LIB'lerde kullanılan en yaygın ayırıcı olarak kullanılmaktadır [20]. Düşük maliyetleri, yüksek güvenli durumları ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle, LFP bataryalar genellikle elektrikli araçlarda ve elektrik depolama sistemlerinde kullanılmaktadır [21]. LFP'lerin tipik bileşimleri Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 1. Elektrikli Araç Batarya Paketlerinin Malzeme Listesi [16] (Material List of Electrical Vehicle Battery Packs)

Batarya Bileşeni (%)	Elektrikli Araç Bataryası						
	LCO	LMO	NMC (111)	NMC (622)	NMC (811)	LFP	NCA
KAM	35,30	40,80	34,70	32,40	31,10	32,70	30,60
Grafit	18,50	14,10	19,40	21,00	20,60	16,80	22,10
Karbon Siyahı	2,40	2,70	2,30	2,20	1,70	2,20	2,10
Bağlayıcı: PVDF	3,00	3,00	3,00	2,90	3,60	2,70	2,90
Cu	16,10	15,00	15,70	16,10	15,70	13,90	16,70
Al	8,10	7,80	8,20	8,40	8,20	7,50	8,60
Elektrolit	14,20	14,40	14,60	14,80	17,00	22,20	14,90
Plastik	2,40	2,10	2,10	2,20	2,10	1,90	2,30

Tablo 2. Bir LFP Pilinin Genel Bileşimi [21] (General Composition of a LFP Battery)

Batarya Bileşeni	Malzeme ve Bileşenler	Ağırlık Yüzdesi (%)
Kasa ve kabuk	Çelik (vidalar dahil)	7,3
	Kablolama	1,1
	Elektrikli ve elektronik ekipman	2,1
	Plastikler	5,7
	Al	22,2
Hücre kasası	Al	8,1
Anot	Karbon	10,9
	Cu folyo	10,5
Katot	Al folyo	6,1
	Li	0,4
	Fe	3,1
	P	1,7
	O	3,5
Ayırıcılar	Plastikler	9,7
Plakalar	Cu	0,6
	Al	0,0
Elektrolit	Çözücü	7,0

LIB'lerin kullanıldığı birçok uygulama alanı mevcuttur. Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tabletler gibi taşınabilir elektronik cihazlar, hibrit, şarjlı hibrit veya tamamen pille çalışan olmak üzere elektrikli araçlar, sabit enerji depolama sistemleri, dronlar ve daha birçok elektrikli cihazlar için LIB uygulaması en uygun teknolojidir [22,23]. Şekil 1'de enerji depolama cihazlarında kullanımları sonrası ömrünü tamamlamış bazı atık LIB örnekleri yer almaktadır. Elektrikli araç piyasasında temel bir bileşen haline gelmiş ve buna bağlı olarak elektrikli araçlara güç veren LIB'lerin, küresel elektrikli araç filosunun (hibritler ve tam elektrikli araçlar dahil) 2030'a kadar 15-25 milyona ulaşması beklenmektedir [24].

LIB'lerin elektrikli depolama cihazlarındaki kullanım ömürlerinin 5-8 yıl (100-150 bin km) olmasından dolayı ticari LIB üretimindeki artışın sürekliliği sonucu ömrünü tamamlamış LIB sayısı da her geçen gün artmaktadır [25]. LIB'lerin

üretiminde kullanılan metallerin rezervlerinin gün geçtikçe azalmasına bağlı olarak uzun süreli ekonomik uygulanabilirlik ve sürdürülebilir kaynak kullanımı durumları endişe yaratmaktadır [26]. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Jeoloji Araştırmaları Kurumu verilerine göre dünya genelindeki toplam Li rezervlerinin 2020 yılında yarısından fazlası Şili'den gelmekteydi [31]. Devam eden araştırmalar sayesinde, belirlenen Li kaynakları dünya çapında önemli ölçüde artarak toplamda yaklaşık 98 milyon tona ulaşmıştır. Şekil 2'de 2023 yılında ülkelerdeki tanımlanmış Li kaynaklarının miktarları milyon ton cinsinden yer almaktadır. Li talebi ve fiyatlarındaki hızlı artış nedeniyle, dünya çapındaki yerleşik Li işletmeleri üretim kapasitelerini artırmış ya da artırma sürecinde olmuştur [145]. Mevcutta kullanılan elektrikli araç bataryalarının ömrünü tamamlaması sonucunda oluşacak atık LIB'lerin geri dönüştürülmesi önem arz etmekte ve küresel LIB

geri dönüşüm pazarının 2030 yılına kadar 23,7 milyar dolar değerinde olması beklenmektedir [27]. Bu verilere bağlı olarak artan talep katot elektrot hazırlamada aktif malzeme olarak kullanılan değerli metal kaynaklarının, özellikle de Li'nin tükenmesine yol açmakta ve bu da Li ile ilgili tüm minerallere olan talebi önemli ölçüde artırmaktadır [28]. Şekil 3'te 2019-2030 yılları arasında ABD'de ömrünü tamamlayarak atık haline gelen elektrikli araç LIB miktarlarının adet cinsinden ön tahmini yer almaktadır. Bu veriler, 2030 yılında ABD'de 918.000'den fazla atık elektrikli araç bataryasının oluşması beklendiğini göstermektedir [146]. Buna bağlı olarak, küresel anlamda üretim maliyetlerini ve kaynak tüketimini azaltmak için atık LIB'lerden değerli malzemeleri geri dönüştürmek büyük stratejik öneme sahiptir [29,30]. Şekil 4'te LIB'lerin hammadde çıkarma ve malzeme üretimi, hücre ve batarya paketi üretimi, nakliye, bataryaları şarj etmek ve batarya durumunu düzenlemek için gerekli enerji, ikinci yaşam kullanım olanakları ve batarya bertarafı veya geri dönüşüm aşamalarından oluşan yaşam döngüsü yer almaktadır. LIB malzemelerinin geleneksel yolu döngüsel olmadığından ve tüm adımlar boyunca enerji gerektiğinden, LIB'lerin geri dönüşümü gibi faydalı adımlar atılması önem arz etmektedir [147]. Atık LIB'ler için olası geri dönüşüm rotaları Şekil 5'te yer almaktadır. Atık LIB'lerin toplama ve taşıma aşamalarının ardından bu bataryalara pirometalurji metal geri kazanım yöntemi veya ön-işlem adımı uygulanmaktadır. Pirometalurji yöntemi hem kapalı döngü olmadığı için hem de saflaştırma gerektirdiğinden elde edilen metal alaşımlar hidrometalurjik metal geri kazanım yöntemine aktarılır. Bu yöntem Li'nin geri kazanıldığı ve yüksek oranda geri dönüşümün sağlandığı bir uygulamadır. Öte yandan, toplanan atık LIB'lere ön-işlem adımları uygulanmaktadır. Mekanik ön-işlem süreçlerinde Fe içeren/içermeyen maddeler, plastikler, Cu ve Al gibi malzemeler siyah kütleden ayrılmaktadır. Elde edilen siyah kütleye, içerisindeki değerli metallerin geri kazanımı için hidrometalurji yöntemi uygulanmaktadır. Değerli metallerin geri kazanımının yanı sıra buradan elde edilen metal tuzlar katot sentezi için kullanılabilir. Ek olarak, elde edilen metal konsantreleri batarya üretimi veya metal endüstrisi için metal konsantreleri olarak kullanılabilir [149,150].

Atık LIB'lerin laboratuvar ölçekli metal geri kazanım proseslerinin yanı sıra değerli metallerin

geri kazanımı için birçok endüstriyel ölçekli uygulamaları da bulunmaktadır. Bu uygulamaların bazıları hidrometalurji ve pirometalurji geri dönüşüm teknolojilerini ayrı ayrı kullanırken bazıları da bu yöntemleri birbirine entegre ederek kullanmaktadır. Hidrometalurjik yöntemin kullanıldığı Recupyl (Fransa) prosesinde fiziksel ve kimyasal proseslerin birleştirilmesi ile Li, lityum karbonat (Li_2CO_3) olarak çöktürülmektedir. Batarya türlerinin işlenmesi amacıyla tasarlanan Toxco (Kanada) uygulamasında Li içeren çözelti Li_2CO_3 üretmek amacıyla karbonatlaştırılmaktadır. Hidrometalurji ve pirometalurji kombinasyonunun kullanıldığı Umicore (Belçika) uygulamasında ise öncelikle sıcaklık uygulaması ile metallerin yer aldığı cüruf elde edilmekte ve ardından hidrometalurjik yöntemdeki asit liçi ve solvent ekstraksiyonu ile bu üründeki değerli metaller geri kazanılmaktadır [150].

Günümüzde LIB katot kimyalarından NCA, NCM ve LFP en yaygın kullanılan teknolojilerdir [31]. Özellikle LFP ve NCM bataryalar, küresel elektrikli araç endüstrisindeki iki ana ürün olup, LFP bataryalarının kurulu kapasitesi NCM bataryalarının kapasitesini aşmıştır [10,13]. LFP bataryalar, bazı endüstri firmaları tarafından kullanılmalarının kabul edilip uygulamalarının artması sebebiyle yakın gelecekte gelişmeye hazır ve otomotiv sektöründeki konumu giderek artan bir teknoloji haline gelmiştir. Üretim şirketleri, devamlılık ve güvenlik avantajlarından dolayı farklı katotlar arasında esas olarak LFP'yi tercih etmektedir. Çin'de Co gibi diğer metallerin kaynakları sınırlı olduğundan ve metalin çoğunun ithal edilmesi gerektiğinden şirketler alternatif kaynaklara yönelmiştir. LFP katot malzemesinde, katotun daha uzun ömürlü, daha yüksek güvenli, düşük maliyetli olduğu ve çevre kirliliğini azalttığı kanıtlanmıştır. Powerwall, Powerpack ve Megapack gibi bazı pil sistemlerinde kullanılabilen LFP bataryalar, sahip oldukları avantajlardan dolayı son yıllarda dünyanın en büyük elektrikli araç üreticisi olan Tesla'nın dikkatini çekmiştir. Daimler ve Ford da bu teknolojiyi daha düşük menzilli elektrikli araçlar için kullandılar [28,32]. Çinli üreticilerin çoğu, elektrikli araçlara yönelik NCM veya NCA bataryalarına kıyasla daha üstün güvenlik performansına ve daha düşük üretim maliyetlerine sahip LFP bataryalar geliştirmek için çalışmalar gerçekleştirmektedir. Ancak LFP bataryalar, NCM ve NCA bataryalara göre daha düşük enerji yoğunluğuna ve daha kısa elektrikli

sürüş menziline sahip olduğundan bu teknolojinin geliştirilmesi kaçınılmazdır [31].

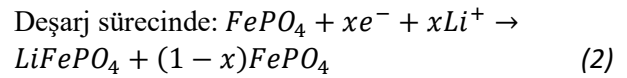
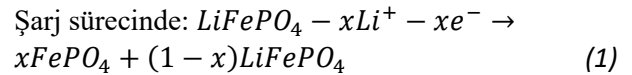
Olivin tipi LFP bataryalar ilk olarak 1996 yılında sentezlenmiş [33] ve düşük hammadde maliyeti, uzun ömür, termal kararlılık, zehirli olmama, patlama tehlikesini azaltma, mükemmel elektrokimyasal performans özellikleri ve daha iyi çevresel performansları ve orta ve düşük menzilli araçlarda yaygın olarak kullanımları nedeniyle enerji depolama, elektronik ekipman ve elektrikli araçlar gibi bazı uygulamalarda oldukça önem kazanmıştır [34-39]. Şekil 6'da enerji depolama cihazlarında kullanımları sonrası ömrünü tamamlamış atık LFP batarya örnekleri yer almaktadır. LFP bataryaları, Li, grafit ve fosfor (P) varlığı nedeniyle stratejik bir malzeme kaynağı olmakla birlikte içerisinde yer alan malzemeler Avrupa Komisyonu tarafından kritik hammaddeler listesine dahil edilmiştir [40].

Kullanım ömrünü tamamlayarak atık haline gelmiş LIB'lerin geri dönüşümü hakkında birçok makale ve rapor bulunmaktadır. Ancak üstün performansları, çevre dostu nitelikleri ve gelecekteki elektrikli araç piyasasında tercih edilecek olmalarından dolayı LFP bataryaların kullanımlarının artarak hammadde tedarik zinciri sorunlarına sebep olması ve bu artışa bağlı olarak atık miktarlarının da giderek artması sonucu odaklanılması gereken atık LFP bataryalardan değerli metallerin geri kazanımına ilişkin nadir çalışma mevcuttur. Bu derleme makalenin teşvik edici amacı, LFP bataryaların geri dönüşüm yöntemlerinin yanı sıra değerli metallerin geri dönüştürülmesi ve seçici olarak geri kazanılması için kullanılan çok sayıda yaklaşım hakkında entegre ve sistematik bir inceleme sağlamaktır. Mevcut derleme çalışmasında, literatürün gözden geçirilmesi için LIB'lerin geri dönüşümü, LFP'lerin geri dönüşümü, LFP'lerde geri dönüşüm konuları giderek daralan huni yaklaşımı ile araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, ön işlemden farklı malzemelerin geri kazanımına kadar atık LFP bataryaların işlenmesindeki en son gelişmelerin kapsamlı bir incelemesini sunmaktır. İnceleme, 1996 ile 2023 yılları arasındaki yayın dönemini dikkate almış ve web sitelerinden elde edilen bilimsel makaleleri ve kamuya açık bilgileri içermiştir. Tüm bilimsel makaleler Akademik Arama Motorları (Google Scholar, ScienceDirect vb.) ve çevrimiçi veri tabanları (Web of Science gibi) aracılığıyla taranmıştır. Atık LFP bataryaların geri dönüşümü

için bu incelemede makalelerin taranmasına farklı LIB'lerin geri dönüştürülmesinden başlanmıştır. Devamında, günümüzde elektrikli araçlarda üstel kullanım göstermelerinden dolayı LIB'lere özgü LFP bataryaların geri dönüşümüne odaklanılmıştır. Batarya üreticilerinin ve otomotiv şirketlerinin çoğu LFP malzemelerine yöneldiği için bu incelemede, atık LFP bataryaların geri dönüşümüne odaklanılmıştır. Bu çalışma, alanda daha fazla araştırma yapmak ve teknolojiyi sektörel boyuta yaklaştırmak için eksiklikleri ve olası çözümleri belirlemede bir rehber olarak kullanılabilir.

2. LFP BATARYALARA GENEL BAKIŞ (LFP BATTERIES OVERVIEW)

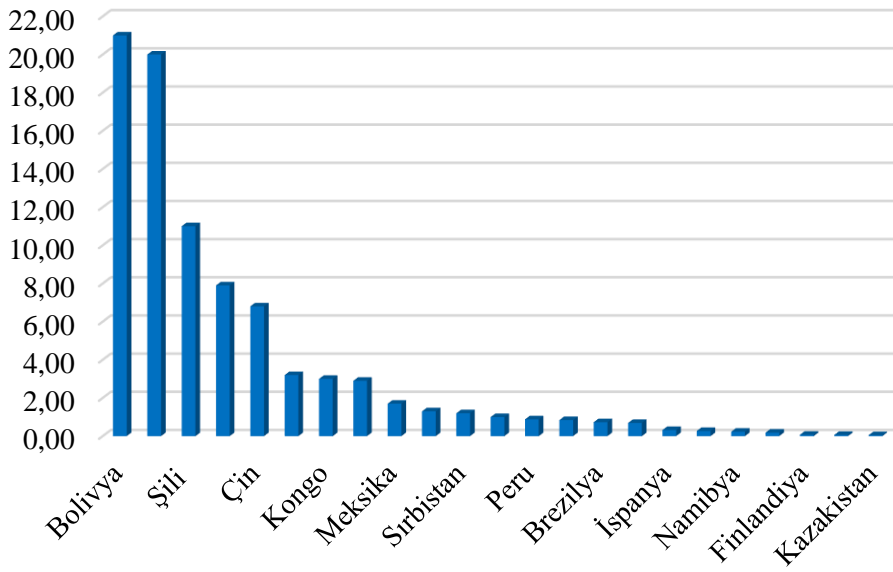
LFP, tetrahedral 4c bölgelerinde P atomları (PO₄) ve oktahedral 4c ve 4a bölgelerinde Fe ve Li katyonları (FeO₆ ve LiO₆) ile Pnma uzay grubunda düzenli bir olivin (ortorombik kafes) yapısına sahiptir [41]. LFP kristal yapısı, Li, Fe ve P'nin oktahedral ve tetrahedral alanların bir alt kümesini oluşturduğu bir ABAB oksijen alt örgüsüdür [38]. Li deinterkalasyonu sırasındaki yüksek faz stabilitesi, PO₄ tetrahedral yapısından kaynaklanmaktadır. PO₄ tetrahedron, LFP'nin yapısında LiO₆ oktahedronu ile FeO₆ oktahedronu arasında konumlandırılmıştır. Li iyon difüzyonu için sadece tek boyutlu delikler oluşturulmuştur. Bu durum şarj ve deşarj sırasında Li⁺ interkalasyonunu ve deinterkalasyonunu sınırlar [42]. LFP, Li⁺ iyonlarını ve elektronları aynı anda çıkararak ve ekleyerek diğer herhangi bir Li pil malzemesi gibi enerjiyi emer ve serbest bırakır [43]. LFP reaksiyon mekanizması aşağıdaki gibidir:



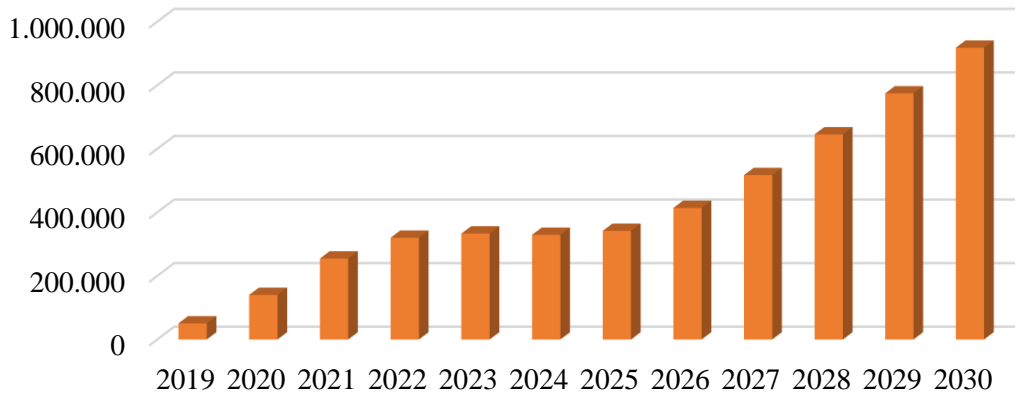
Şarj-deşarj reaksiyonu, LiFePO₄ ve demir (III) fosfat (FePO₄) olmak üzere iki faz arasında gerçekleşir. Li-iyonu, LiFePO₄'ten çıkar ve şarj işlemi sırasında FePO₄ fazını oluşturur. Deşarj işlemi sırasında ise FePO₄'ü içine yerleştirerek LiFePO₄ fazına neden olur. Li-iyon indirgeme ile geç şarj sırasında akünün iç direnci ve terminal voltajı hızla artar. Bataryanın terminal voltajı şarj kesme voltajına ulaştığında, batarya voltajı şarj kesme voltajını aşmayacak şekilde şarj akımı düşürülür [44,45].



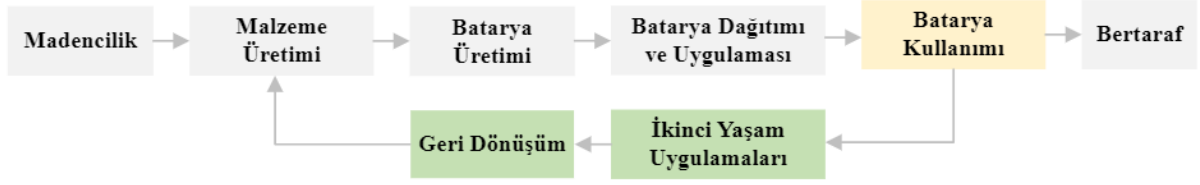
Şekil 1. Atık LIB'ler (Yazarlar Tarafından Temin Edilmiştir) (Waste LIBs (Provided by the Authors))



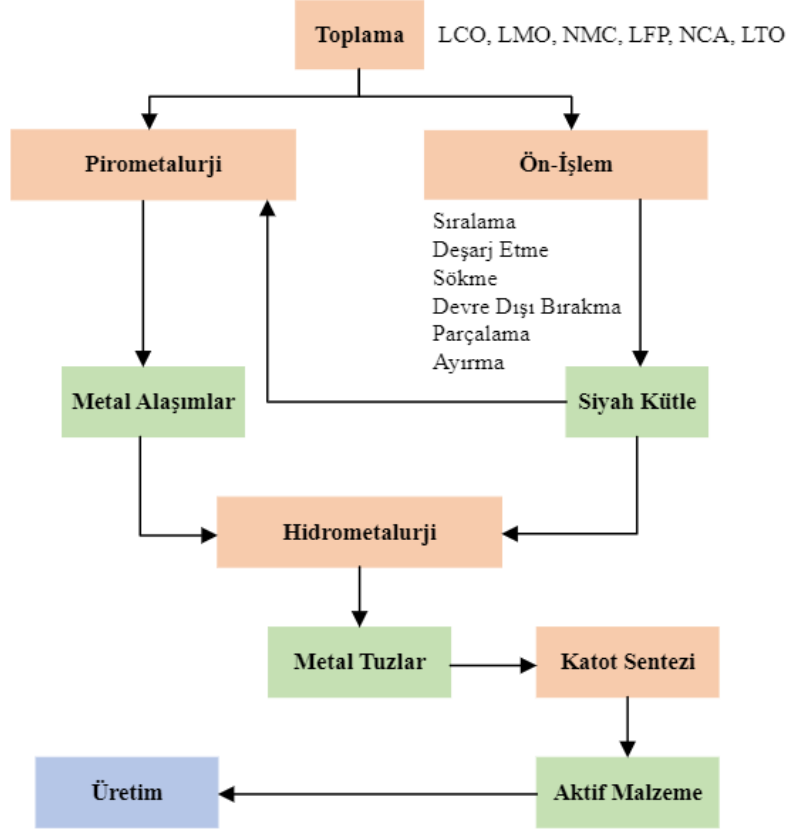
Şekil 2. Ülkelerdeki Tanımlanmış Lityum Kaynaklarının Miktarları, 2023 (Kaynak [145]'ten oluşturulmuştur) (Amounts of Identified Lithium Resources in Countries, 2023 (Derived from Source [145]))



Şekil 3. ABD'deki Elektrikli Araç Atık LIB Miktarları (Kaynak [146]'dan oluşturulmuştur) (Electrical Vehicle Spent LIB Amounts in the United States (Derived from Source [146]))



Şekil 4. LIB'lerin Yaşam Döngüsü (Kaynak [147]'den oluşturulmuştur) (Life Cycle of LIBs (Derived from Source [147]))



Şekil 5. Atık LIB'ler için Olası Geri Dönüşüm Rotaları (Kaynak [148] ve [149]'den oluşturulmuştur) (Possible Recycling Routes for Spent LIBs (based on Sources [148] and [149]))



Şekil 6. Atık LFP Batarya (Yazarlar Tarafından Temin Edilmiştir) (Spent LFP Battery (Provided by the Authors))

3. LFP BATARYALARDAN LİTYUM GERİ KAZANIMI (LITHIUM RECOVERY FROM LFP BATTERIES)

LFP bataryalar cıva, kadmiyum, kurşun ve diğer zararlı ağır metalleri içermediği için genellikle 'yeşil' bataryalar olarak bilinseler de bu durum LFP bataryaların tamamen zararsız ve çevre dostu olduğu anlamına gelmez. Zehirli elektrolitler, metaller, organik bileşikler ve polimerler içeren atık LFP bataryalara uygun şekilde toplama, depolama ve arıtım işlemleri uygulanmadığı takdirde önemli derecede çevre ve güvenlik sorunları oluşmaktadır [46]. Li elementi, LFP'lerin ağırlıkça %1,1'ini oluştursa da bu tür atık bataryaların devamlı geri dönüşümünü sağlamak için etkili bir geri dönüşüm stratejisinin yanı sıra kurallar ve mevzuat gereklidir [47]. Wang ve Wu (2017), Çin'deki atık LFP bataryaların geri dönüşümünün mevcut durumunu incelemiş, ön-işlem ve bataryadaki bileşenlerin geri kazanımındaki son durumu tartışmıştır, ancak çalışma belirli bir coğrafi alanla sınırlı kalmıştır [48]. Elwert vd. (2019), LFP bataryaların geri dönüşümünde endüstriyel ölçekli yaklaşımlara odaklanmış ve sadece birkaç araştırma çalışması örneği sunmuştur [49].

Geri dönüşümde en büyük sorunlardan biri değişkenlik gösteren atık akışıdır. Bu durumun temeli, enerji depolama cihazlarına olan talebin her geçen gün artması ve bunun sonucunda LIB elektrot malzemelerindeki çeşitliliğe [50]. Literatürde pirometalurji, hidrometalurji ve elektrokimyasal ekstraksiyonu içeren ön-işlem ve birincil işleme olmak üzere ayrılabilen birçok farklı geri dönüşüm süreci vardır [51,52]. Atık bataryaların çok çeşitli malzemelere sahip olması ve her aşamada yöntemin dikkatli bir şekilde uygulanması nedeniyle geri dönüşüm süreci karmaşık kabul edilmektedir [53]. Bu nedenle, ilk adım olan ön-işlem aşamasındaki fiziksel ve kimyasal ayırma adımları geri dönüşümde dikkat edilmesi ve odaklanması gereken ilk aşamadır [54]. Ön-işlemin amacı, geri kazanım oranlarını artırmak, atık akışını bir sonraki işlem adımına hazır hale getirmek ve buna bağlı olarak pirometalurjik, hidrometalurjik veya elektrokimyasal geri dönüşüm işlemlerindeki enerji kullanımını azaltmaktır [55,56]. Bataryaların geri dönüştürülmesinde sürdürülebilir bir yol uygulanması için için geri dönüşüm sürecinin ekonomik, verimli ve en önemli ilkelerden biri olan çevre dostu olması gerekmektedir. Bu sürdürülebilirlik unsurlarına göre, LCO bataryalarda yaygın olarak uygulanan pirometalurjik ve hidrometalurjik geri dönüşüm

yöntemleri LFP bataryalar için geçerli değildir. LFP bataryalarda uygulanan geleneksel geri dönüşüm yöntemleri, enerji kullanımı, malzeme tüketimi ve önemli çevresel sorunlar nedeniyle Co'nun yokluğunda ekonomik olarak uygun değildir [31]. LFP bataryaların ekonomik geri dönüşümü, yapılarındaki değerli metallerin az olması nedeniyle bir zorluk teşkil etse de geri dönüş akışlarının artması durumundan dolayı bu bataryaların geri dönüşümlerinin ele alınması gerekir [57]. Ek olarak, LFP bataryalar, düşük toksisite nedeniyle genellikle çevre dostu bataryalar olsa da çevresel sorunlara neden olabilmektedirler [58]. Bu duruma örnek olarak, atık LFP bataryalar içerdikleri zehirli $LiPF_6$ ve metal iyonları içeren organik elektrolitleri nedeniyle doğrudan bertaraf edildiğinde veya uygun olmayan yollarla geri dönüştürüldüğünde yavaş yavaş toprağa ve yeraltı suyuna karışmaktadır [59]

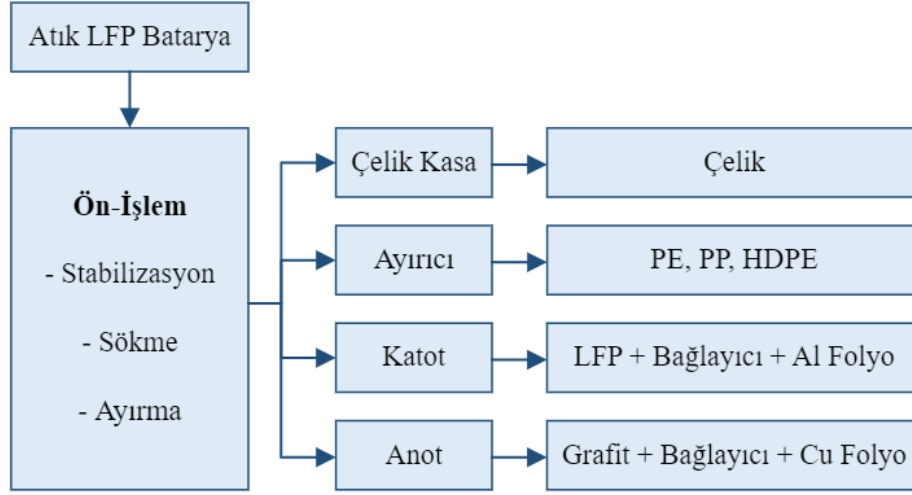
3.1. Ön-işlem (Pre-treatment)

LIB'lerin geri dönüşümünün ilk aşaması olan ön-işlem aşaması, aktif katot bileşenlerini pil hücrelerinin kabuğundan, elektrolitten, karbonlu bileşenlerden, ayırıcıdan ve akım toplayıcıdan ayırmak amacıyla uygulanmaktadır. Şekil 7'de atık LFP batarya ön-işleminin akım şeması yer almaktadır. Katot bileşeninin Al akım toplayıcıdan, bağlayıcı malzemedan ve iletken katkı maddesinden ayrılmasının ardından geriye kalan kütle katot aktif malzeme (KAM) olarak ifade edilmektedir. Literatürde kullanılan yöntemler laboratuvar ölçeği ve endüstriyel ölçek olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Laboratuvar ölçeğindeki yöntemler, iyi bir KAM ayırımı ve bu ayırımın verimliliğini sağlar. Gövde daha sonra katot ve Al akım toplayıcı tabakayı almak için elle sökülür. Bu yöntemler için (KAM'daki bileşenlerin uygun asit, baz, tuz vb. reaktiflerle etkileşmesi sonucunda metallerin çözeltiye geçerek çözünmesi işlemi) ve metal geri kazanımı dahil olmak üzere araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer yandan, endüstriyel ölçekli yöntemler, daha yüksek işlem hacmi ve kapasitesine sahip olmasına rağmen daha az verime hedef metal ayırımı gerçekleştirmektedir [60]. Katot malzemesini atık LFP'lerden güvenli bir şekilde geri kazanmak için ön-işlem işlemi, geri dönüşüm sürecinde atılan ilk adımdır [61]. Geri dönüşüm işlemleri sırasında pil hücrelerinde meydana gelebilecek kısa devreleri önlemek için, atık bataryaların depolanması ve deşarj işlemleri sırasında uygulamanın güvenli ve doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak, bataryada

bulunan elektrik yükünün neden olduğu kısa devre veya yangın riskini azaltmak ve pildeki elektrik yükünün tamamen uzaklaştırıldığı doğrulamak için önce deşarj etme adımı gerçekleştirilir [31].

Atık LFP'lerden farklı bileşenlerin sökülmesi veya ayrılmasının ardından öğütme, eleme, ince kırma, manyetik ayırma ve sınıflandırma gibi mekanik ön-ışlem işlemleri gerçekleştirilir [62,63]. Diğer yandan, mekanik ayırma prosedürleri atık bataryanın tüm bileşenlerini tamamen ayıramaz

[64-66]. Bu aşamanın avantajı metal kasa ve plastiğin otomatik olarak ayrılabilmesidir. Diğer yandan, katot malzemelerinin yapısı sağlam ve dayanıklı olduğu için, kırma aşamasında atmosfere zehirli gaz salımı gerçekleşmekte ve LFP katot aktif bileşeni metalik olmayan kısma yapıştığı için değerli malzemeler kaybolabilmektedir. Bu sebeple, atık LIB'lerden değerli metallerin geri dönüştürülmesinde ön-ışlem aşaması kaçınılmazdır [48,67].



Şekil 7. Atık LFP Batarya Ön-İşlemi Akım Şeması (Kaynak [31]'den oluşturulmuştur) (Spent LFP Battery Pre-treatment Flow Chart (Created from Source [31]))

3.1.1. Stabilizasyon (Stabilization)

LIB'ler yüksek voltaj değerlerine sahip olduklarından düşük voltajlarda enerji depolayamazlar ve bataryanın enerji depolayabilmesi için gerekli voltajın altında deşarjını önlemek için bir devre koruma modülüne sahiptirler [68]. Çevrim ömrü açısından, %80 deşarj derinliğinde 1000 çevrime kadar bir kullanım ömrü talep edilmektedir. Bu nedenle, atık LIB bataryaları fazladan bir kapasiteye sahiptir ve kısa devre ya da kendiliğinden tutuşma kaynaklı patlamaları önlemek amacıyla diğer herhangi bir adımdan önce tamamen deşarj edilmelidir [69]. Atık bataryanın deşarj edilmesi için yöntemler mevcuttur. Bataryaların kısa devre yapmasını sağlayarak tam deşarj işleminin gerçekleşmesi için bataryaları tuzlu su çözeltisinde bekletmek veya pil takımının elektrik yükünün uzaklaştırılması için doğrudan şarj ve deşarj ekipmanı kullanmak en yaygın yöntemlerdir [48]. Kendiliğinden tutuşmayı ve kısa devreyi önlemek için, piller ağırlıkça %5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içeren ve iletken olmayan bir kap içerisinde bekletilir ve bu iyonlar kısa devre yapar. Böylece LFP'lereki elektriksel yük uzaklaştırılarak tamamen deşarj gerçekleştirilir

[31,58,70]. Bir başka yöntem ise atık bataryanın yüksek bir sıcaklıkta (300 °C gibi) devre dışı bırakıldığı termal ön işlemdir. Büyük ölçekli Avrupa süreçleri, genellikle hücreleri açmadan önce bu stabilizasyon tekniklerini kullanmaz ve atıl bir atmosfer altında sökme işlemini tercih eder. Özellikle karbondioksit altında pilin açılması işlemi, bu ortamdaki herhangi bir Li metali üzerinde pasifleştirici bir Li₂CO₃ tabakasının oluşmasına izin verir. Ek olarak, literatürde yer alan çalışmalar ile elektrolit deaktivasyon işleminin soğutulması sonucu donma koşullarının atık LFP'lerin elektriksel yüklerinin uzaklaştırılmasına neden olduğu düşünülmektedir [15,61,71].

3.1.2. Sökme (Dismantling)

Mekanik ayırma işlemi, atık LFP bataryaların elektriksel yüklerinin tamamen uzaklaştırılmasının ardından gerçekleştirilen adımdır [72]. Bu ön-ışlem sürecinde plastik kasa, baskılı devre kartları, kablolar, Al ve Cu folyolar, ayırıcı gibi farklı bileşenleri ayırmak için atık batarya bir sökme aşamasına tabi tutulur ve uygulanacak geri dönüşüm yollarıyla daha fazla geri kazanılır. Endüstriyel ölçekte, daha fazla geri kazanım

verimleri için farklı bileşenleri ayırmayı amaçlayan kırma, manyetik ve mekanik ayırma gibi üniteleri içeren mekanik bir işlem uygulanır [15]. Parçalama ve kırma işlemleri, Li'nin şiddetli reaksiyonlarını önlemek ve organik çözücülerin oluşturduğu riskleri en aza indirmek için bazen inert veya kriyojenik atmosferlerde gerçekleştirilir. Metalik Li ile su veya nem arasındaki temas, yoğun ekzotermik reaksiyonlara sebebiyet vererek H ve O oluşturur ve bu durum da yüksek patlama tehlikesine yol açar [73]. Bir başka endüstriyel ölçekli işlemde, bataryalar herhangi bir ön işlem aşaması olmaksızın fırına beslenir [15]. Laboratuvar ölçeğinde en yaygın uygulanan sökme yöntemi manuel sökmedir [74-77]. Atık LFP bataryanın anot bağlayıcısının etkisi önemsizdir ve Cu folyo mekanik olarak ezilebilir veya grafit tozundan ayrılması için suda bekletilebilir. En yaygın katot bağlayıcı olan PVDF'nin folyo ile etkileşiminin kuvvetli olmasından dolayı PVDF'nin Al folyodan ayrılması zordur. Bir Al folyodan katot malzemesinin ayrılması, atık LFP bataryaların işlenmesinde önemli bir sorun oluşturmaktadır [65]. Song vd. (2017), deşarj edilmiş LFP bataryaları çelik testere ile söküp, pil ana iskeletini çıkarmıştır. Ardından, iskeletin en dış katmanında yer alan yumuşak ambalajı makasla keserek katot ve anot plakaları elde etmiş ve son olarak bu plakaları küçük bir bıçak kullanarak ayırıştır [77]. Yang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, plastik kasalar çıkarıldıktan sonra çelik kasa mekanik olarak çıkarılmış ve daha sonra anot ve katot manuel olarak ayrılarak Cu ve Al folyolar ayrı ayrı geri dönüşüm için toplanmıştır [78]. Chen vd. (2016), özel ekipman kullanarak ayırıcıyı ve katot ve anot plakalarını ayırmış ve proseslerini kapalı bir kutu içinde gerçekleştirerek elektrolit gazının çevreye karışmasını engellemiştir [62]. Elektrolit içerdiği zehirli ve buhar ve gazlardan dolayı atmosfere karışma gibi tehlikelere sahiptir. Otomobil bataryalarındaki hücrenin ağırlıkça %12-14'ünü oluşturan elektrolit, genellikle EC ve PC karışımı gibi bir organik çözücü içinde çözülmüş tipik olarak LiPF₆ olan bir Li tuzundan oluşur. LiPF₆, suda toksik hidrojen florür (HF) salarak hidrolize olur. EC ve PC hem yanıcı hem de cildi tahriş edicidir. Bu sebeple, bataryaların elektriksel yükleri tamamen uzaklaştırılmış olsa bile, elektrolitin neden olduğu yanıcılık ve zehirli gazlar içerme özelliklerinden dolayı sökme aşamasındaki tehlikeleri en aza

indirmek için bataryalar kıvılcım içermeyen ve iyi havalandırılan bir alanda açılmalıdır [73].

3.1.3 Katot malzeme ve alüminyum folyonun ayrılması (Separation of cathode material and aluminum foil)

LFP bataryanın katot malzemesi, katot elektrotunu oluşturmak için organik bir bağlayıcı karıştırılmış ve Al folyo üzerine kaplanmış durumdadır. Bu nedenle, katot malzemesinin Al folyodan etkin bir şekilde ayrılması ve metallerin geri kazanılması kritik öneme sahiptir. Organik bağlayıcıların görevi, katot malzemesi ile Al folyo arasındaki kimyasal bağı korumaktır ve bu bağlayıcılar PVDF, poliimid ve PVDF'nin en yaygın olarak kullanıldığı poliakrilik asit içermektedir [10,79,80]. PVDF'nin kimyasal yapısı, katot malzemesinin ve Al folyonun ayrılmasını zorlaştırabilmekte ve potansiyel olarak zehirli organik flor (F) bileşiklerinin üretimine de yol açabilmektedir [81,82]. Katot malzemesinin ve Al folyonun ayrılması, Al folyonun geri kazanılmasıyla birlikte metal geri kazanım sürecini de basitleştirmektedir. Ek olarak, PVDF'nin geri kazanılması, halojenli malzemelerin çevresel risklerini ortadan kaldırabilmektedir [83]. Atık LFP bataryalardan metal geri kazanım sürecinde, Al folyo katot malzemelerinden fiziksel ayırma, yüksek sıcaklıkta ayırma, çözelti ayırma ve çözücü ayırma yöntemleriyle ayrılmaktadır [10].

Katot malzemesinin ve Al folyonun ayrılması teknik bir zorluk olmasa da yukarıda belirtilen teknolojilerin bazı eksiklikleri vardır. Örneğin, fiziksel ayırma işleminde gerçekleşen grafit tozunun uçması, yüksek sıcaklıkta ayırmadaki enerji tüketiminin geri kazanım maliyetini artırması ve Li kaybına neden olması ve çözelti ve çözücü ayırma yöntemlerinde kolay uygulanabilirlik olmaması temel eksikliklerdir. Yüksek sıcaklıkta ve sıvı fazda Li kaybı göz önüne alındığında, fiziksel ayırma daha verimli bir yol olarak kabul edilse de toz oluşumundan kaynaklanan kirlilik uygun şekilde kontrol edilmelidir [10]. Pil hücrelerinde bulunan farklı malzemelerin ayrılması yüksek verimlilikteki geri kazanım için farklı tekniklerle gerçekleştirilebilir. Tablo 3'te katot malzemelerinin ayrılması için yöntemler yer almaktadır.

Tablo 3. LFP Katot Malzemelerinin Ayrılması için Yöntemler (Methods for Separation of LFP Cathode Materials)

Yöntem	Koşullar	Referans
Kimyasal Ayırma	Distile su, 4 saat (sa) ve 100 °C	[84]
	N-metil-2-pirolidon (NMP), 1 sa ve 100 °C	[74]
	0,4 mol/L sodyum hidroksit (NaOH), 30 dakika (dk), katı/sıvı (K/S) oranı 100 g/L ve ultrasonik destekli	[85]
	Dimetilasetamid (DMAC), 30 dk, 30 °C ve K/S oranı 50 g m/L	[77]
	Su, 1 sa ve ultrasonik destekli	[78]
	10 mol/L NaOH ve ultrasonik destekli	[86]
	Seyreltik NaOH	[62]
Isıl Ayırma	550 °C ve N ₂ ortamında piroliz	[76]
	2 sa ve 550 °C'de piroliz	[70]
	1 sa ve 600 °C	[87]
	300 °C'de piroliz	[88]

KAM, Al folyoyu uygun bir çözücüye batırarak, aktif malzemeyi süzme, ardından bir yıkama aşaması ve kurutma yoluyla toplayarak kimyasal işlemlerle ayrılabilir. Bataryadaki bağlayıcıları veya Al folyoyu ayırmak için bir alkali çözelti veya organik çözücü kullanılabilir. Örneğin, NMP [74] ve DMAC, bağlayıcıları çözmek ve katot bileşenlerini Al folyodan ayırmak için organik çözücüler olarak kullanılmıştır [77]. Li vd. (2018), KAM Al folyodan 100 °C'de 1 saat bekleterek ayırmak için NMP kullanmıştır. Süzme ve kurutmadan sonra, asetilen siyahı ve PVDF bağlayıcı gibi safsızlıkları gidermek için katot tozu 400 °C'de 1 saat kalsine edilmiş ve ardından bilyalı değirmende 30 dk öğütülmüştür [74]. Song vd. (2017) çalışmasında, katot plakasını keserek 1x1 cm boyutlarına getirmiş ve daha sonra katot materyallerini ve Al folyoyu ayırmak için 30 °C'de ve 30 dk DMAC içerisinde bekletmiştir. Katot tozu süzildikten sonra toplanmış ve 60 °C'de 24 saat kurutulmuştur [77]. Al folyonun kimyasal olarak ayrıldığı çalışmalarda ultrasonik destekli su [78] ve distile su [84] kullanılan koşullar da mevcuttur. Yang vd. (2017), suda ultrasonik destekli ve mekanik iyileştirme tekniği ile katot malzemelerini 1 saat içerisinde Al folyodan ayırdı [78]. Jiang vd. (2019), kesilerek 3x3 cm boyutlarına getirilmiş atık LFP'lerin pozitif plakalarını, 30 dk oda sıcaklığındaki distile suda bekletmiş ve aktif malzemeleri Al folyodan ayırmak için bir cam çubuk kullanmıştır. Karışımı süzüp 100 °C'de 4 saat kurutmuş ve geri kazanım için aktif malzemeyi toz haline getirmiştir [84]. Ek olarak, Al folyoyu ve katot bileşenlerini ayırmak için sulu bir NaOH çözeltisi kullanılmakta [62], NaOH sulu çözeltisi ve ultrasonik yardımıyla KAM Al folyodan uzaklaştırılmaktadır [86,85] Bian vd. (2016) tarafından yapılan çalışmaya göre, katot

malzemelerinin ultrason yardımı ile 10 mol/L NaOH sulu çözeltisinde bekletilmesi sonucu katot Al folyodan ayrılmıştır. Çalışmada folyo metalik formunda geri kazanılmış ve atık LFP malzemeleri süzülerek, sırasıyla deiyonize su ve etanol ile yıkanarak ve 80 °C'de kurutulmuş toplanmıştır [86]. Li vd. (2017), katot plakalarını Al folyolardan ayırmak için 100 g/L katı-sıvı (K/S) oranı ile ultrason altında 30 dk boyunca 0,4 mol/L NaOH çözeltisine daldırmıştır. Deiyonize su ile yıkama aşaması ve 120 °C'de 4 saat kurutmanın ardından, katot malzemelerini ezerek sonraki liç aşaması için eleme işlemi uygulamıştır [85]. Mekanik ayırma sonrasında, folyolar gibi metalik parçaları, ayırıcıyı içeren bileşenler, elektrot malzemelerini ve siyah kütle olarak adlandırılan elektrolit gibi organik bileşenleri içeren diğer kısımlar olmak üzere bileşenler ayrılmakta ve bu parçacıklar eleme ile iki tür parçacık boyutuna ayrılmaktadır [89].

KAM'ı Al folyodan ayırmanın başka bir yöntemi, bağlayıcıyı yüksek sıcaklıklarda [87] ayrıştırmak için kullanılan ve piroliz adı verilen yüksek sıcaklıkların uygulandığı [70,76] ısıl arıtım yöntemidir ve piroliz işlemi genellikle azot (N₂) atmosferinde gerçekleştirilmektedir [90]. Zheng vd. (2016), elektroliti süperkritik bir yöntemle topladıktan sonra katot malzemeyi yaklaşık 2x2 cm boyutlarına getirip 450-650 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda 1 saat termal işleme tabii tutmuştur. Bu işlem ile elektrottaki bağlayıcıların ve karbonun uzaklaştırılması sağlanmış ve sonraki geri kazanım adımını kolaylaştıran Fe (II), Fe (III)'e oksitlenmiştir. Elde edilen toz ise eleme ile Al toplayıcıdan ayrılmıştır [87]. Bi vd (2021), katot malzemeleri ve Al folyoyu ayırmak için düşük sıcaklıkta ısıl işlem ve 300 °C'de mekanik ezmeyi birlikte uyguladıkları yöntemde, asetilen siyahı ve PVDF'nin tamamen ayrışmasını sağlamıştır [88]. Atık LFP bataryaları geri dönüştürmek için fiziksel

ayırma ve pirolizden oluşan bir süreç öneren Zhong vd. (2019), organik elektrolitlerin neredeyse tamamını geri dönüştürmüş ve LiPF_6 'yı uzaklaştırmıştır. Aktif maddeler, N_2 gazı ile 550 °C'de 2 saat boyunca piroliz işleminin ardından akım toplayıcılardan etkin bir şekilde ayrılmıştır. Piroliz sonrası elde edilen katı ürünler renk ayırma, yüksek basınçlı su ile temizleme ve yuzdürme işlemleri ile geri dönüştürülmüş ve KAM geri kazanılmıştır [70]. Atık LFP'lerdeki ana bileşenlerin piroliz sürecini ve piroliz davranışlarını izokonversiyon yöntemi kullanarak araştıran Liu vd. (2019), elektrolit, ayırıcı ve PVDF'yi pirolitik gaz ve yağa dönüştürmüştür. Piroliz sonrası elde edilen katı ürünlerin karbon tozu, florokarbon, hidrokarbonlar, aktif maddeler, Cu ve Al folyolardan oluştuğunu bildirmişlerdir. Çalışmada LFP ve C içeren aktif maddelerin pirolizden sonra yok olmadığı ve yeni piller üretmek için hammadde olarak yeniden kullanılabilmesi bildirilmiştir [70,76]. Ayrıca, elektrokimyasal teknikte katot plakaları, KAM'ı Al folyolardan ayırmak için elektroliz edilir. Katot ve anot aktif malzemelerini ayırmanın başka bir yolu, üç elektrot arasındaki elektrik deşarjlarının ortam boyunca yayılan şok dalgaları oluşturduğu elektrohidrolik parçalanma kullanmaktır. Bu parçalanma sayesinde katot ve anot malzemelerinin (siyah kütle) elektrot folyosundan basit ve yavaş bir şekilde sıyrılması sağlanmaktadır [91].

3.2. Lityum geri kazanım teknolojileri (Lithium recovery technologies)

Atık LFP bataryalardaki en değerli metal Li elementidir. Geri dönüşüm teknolojilerinde Li, seçici olarak ekstrakte edilebilmekte ve geri kazanım için yüksek değerli Li bileşiklerine dönüştürülebilmektedir [92]. Li geri kazanımı için pirometalurji, hidrometalurji, mekanokimya ve elektrokimya gibi birçok teknoloji [10] geliştirilmiş olsa da atık batarya geri dönüşümü için yaygın olarak iki geri dönüşüm stratejisi uygulanmaktadır. KAM tozu ayrıldıktan sonra, biri yaygın olarak kullanılan hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemlerle malzeme geri kazanımını ve diğeri aktif malzemenin kendisini yeniden üretmeyi amaçlayan iki ana yol uygulanabilir [15]. LIB'lerin pirometalurji sürecinde, katot malzemelerine yüksek sıcaklık uygulanmasıyla Li'nin dönüştürülmesi ve geri kazanılması gerçekleştirilmektedir. Yöntemde, yüksek enerji girişi ve florürün (F^- 'nin) buharlaşma kirliliği yöntemin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Diğer yöntemde, atık LIB'lerden Li, Co, Mn, Ni ve Fe gibi değerli metalleri liç etmek için hidrometalurjik işlem kullanılır. Ayrıca, atık LIB'lere asit, alkali

veya doğal organik asit gibi uygun bir çözücü ile liç işlemi uygulanır, ardından çöktürme veya elektrokimyasal ayırma yöntemi ile liç çözeltisinden metaller geri kazanılır. Hidrometalurji, asit liçi ve kimyasal çöktürme ile birlikte kullanıldığında Li liç edilebilir, ancak çözeltiden kaynaklanan ve kimyasal içeren atıksu yöntemi sınırlamaktadır [93-95]. Yaygın kullanılan bu yöntemler dışında mekanokimya ve elektrokimya gibi teknolojiler, Li geri kazanımı için çevre dostu seçenekler sunmasına rağmen yüksek enerji tüketimi dezavantajına sahiptir [96,97].

3.2.1. Pirometalurjik yöntem (Pyrometallurgical method)

Pirometalurjik süreç, LIB bileşenlerinin fiziksel olarak ayrıştırılması için atık LIB'lerin yüksek sıcaklıkta işlendiği fiziksel işlem olarak bilinmektedir. Bu yöntemde ilk olarak elektrolitten kaynaklanacak patlama risklerinin en aza indirilmesi için düşük sıcaklık sağlanır. İkinci adımda ise, atık LIB malzemesinin yeniden kristalleşmesi için daha yüksek bir sıcaklık uygulanır. Yöntem eritme, kalsinasyon, kavurma ve rafinasyon olmak üzere başlıca dört kategoriden oluşmaktadır [28]. Pirometalurji, metal oksitlerin liç ile ayrılabilen bir Co, Cu, Fe ve Ni alaşımına dönüştürülmesinde pilleri eritmek için genellikle 1400 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıkları içermektedir [98]. Pil tasarımlarına karşı esnek ve yüksek miktarda Ni ve Co içeren piller için uygun maliyetlidir. Daha az pahalı malzemelerden (LMO ve LFP) yapılmış piller için avantaj sağlamaz. Buna ek olarak toksik emisyonlar ve enerji tüketimi, endişe konusudur [99]. Literatürdeki pirometalurji çalışmalarına bakıldığında, Zhang vd. (2022), belirli sıcaklıkta (<1000 °C) karbotermik indirgemenin, Li metal oksitlerini geçiş metallerine ve Li_2CO_3 ürününe dönüştürerek Li ve geçiş metallerini geri kazanmanın etkili bir yolu olduğunu kanıtlamıştır. Ancak LFP, kararlı olivin yapısı nedeniyle karbon ile indirgenemediği için LFP'nin kimyasal bağlarını kırmak ve böylece karbotermik indirgemeyi sağlamak için sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile Fe ve Li tuzları oluşturulmuştur. Aktive edici kimyasal olarak Na_2CO_3 kullanıldığında %99,2'lik bir Li geri kazanım oranı ve NaOH kullanıldığında ise yaklaşık %93 Li geri kazanım oranı elde edilmiştir [100].

Pirometalurjik süreçlerde ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, yüksek miktarda enerji tüketimi (ve sera gazı emisyonları), pil malzemelerinin sınırlı geri kazanımı ve ayrıca operasyon için gereken

büyük hacimdeki bataryalar ana zorluklardır. Buna ek olarak, yöntem yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden aktif Li'nin uçması ve böylece Li geri kazanımında istenen verimliliğin sağlanamaması dezavantajdır. Co içeriğini azaltma eğilimi, pirometalurjik geri dönüşüm ekonomisini önemli ölçüde etkileyecektir. Al ve Cu gibi bazı pil malzemelerinin ön işlem ile uzaklaştırılması da işleme ekstra bir maliyet getirmekte ve mevcut tesisin enerji tüketimini artırmaktadır [10,101]. Son olarak pirometalurjik adımdan elde edilen Küresel Isınma Potansiyeli etkisi, hidrometalurjiden daha yüksektir [99].

3.2.2. Hidrometalurjik yöntem (Hydrometallurgical method)

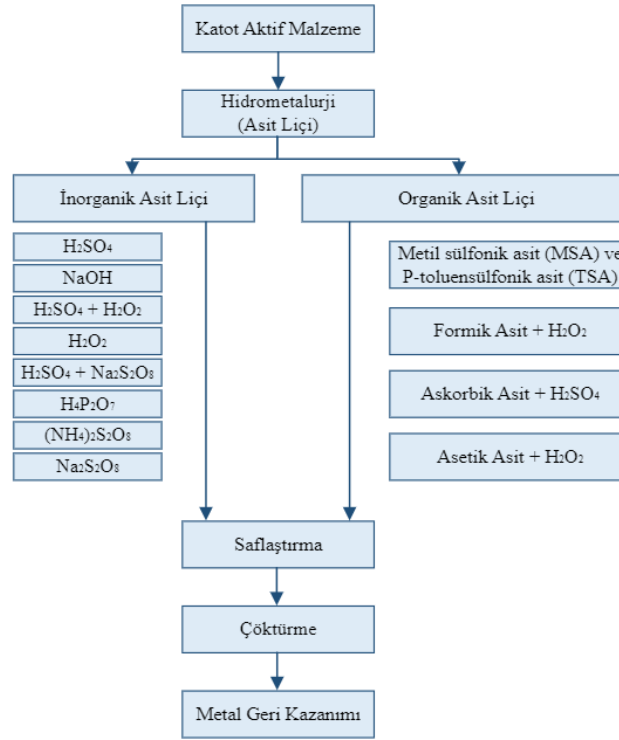
Ön-işlem aşamasının ardından uygulanan adımda siyah kütleden değerli bileşenlerin liç edilmesi için güçlü asit çözeltileri kullanılmaktadır [102,103]. Geri kazanım aşaması, KAM'ı üretmek amacıyla kalsine edilebilen değerli metalin tuz formunda ekstraksiyonu için çöktürme, solvent ekstraksiyonu, yeniden çöktürme ve kristalleştirmeyi içermektedir [104-107]. Ayrılan siyah kütle, hidrometalurji adı verilen kimyasal metal ayırma işlemine tabi tutulur. Pirometalurji, karbotermik indirgeme kavurma, elektroliz, mekanokimyasal vb. gibi siyah kütleden değerli metalleri geri kazanmak için birçok yöntem mevcut olsa da bu çalışmada, atık LFP bataryalardan Li geri kazanımında hem endüstri tarafından iyi bir şekilde kabul görüldüğü hem de yüksek saflıkta metaller liç edilebildiği için hidrometalurji yöntemine odaklanılmıştır. Hidrometalurji yöntemi liç maddesinin doğasına bağlı olarak inorganik asit liçi ve organik asit liçi olmak üzere iki türe ayrılmaktadır [31].

Hidrometalurjik prosedürler, yüksek saflık ve verimlilikte değerli metalleri geri kazanmak için atık bataryaların geri dönüşümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrılan KAM, bu geri dönüşüm yönteminde normal olarak bir asit çözeltisinde iyonlar olarak liç edilir. Bu süreçte, tüm metaller bir çözelti içinde liç edilebilir ve yüksek saflıkta etkili bir şekilde geri kazanılabilir. Böylece, bu yöntem dayanıklı ve çeşitli katot bileşimleri için uygun bir geri dönüşüm prosesi olarak kabul edilmektedir [60]. Hidrometalurji yöntemi dioksin ve furanlar gibi zehirli gazlar veya toz ve uçucu metallere sebep olan termal işlemlere göre daha az gaz emisyonu

oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, düşük enerji tüketimi gerektiren bir yöntemdir [108]. Yüksek geri kazanım oranı, yöntem sonrası cüruf oluşmaması ve yöntemin kolay uygulanabilirliği de diğer avantajlar arasında yer almaktadır. Yüksek miktarda atıksu ve çamur üretimi ve buna bağlı olarak atıkların dikkatli bir şekilde bertaraf edilmesi gerekliliği de yöntemin dezavantajlarıdır [15]. Hidrometalurjik işlemler sırasında çözeltideki Li⁺'nin kolay hidrolizi nedeniyle Li'nin geri kazanımı istenen verimlilikte değildi [109-111]. Bu nedenlerle, yalnızca sınırlı sayıda çalışma, atık LFP bataryalarının geri dönüşürülmesine odaklanmış ve çalışmaların geri dönüşüm teknolojilerinin hala geliştirilmesi gerekmektedir [48,112]. Atık LFP KAM'ını geri kazanmak için asit ve alkali liç yöntemleri yaygın olarak kullanılsa da Li'nin seçici liç işlemi ve Fe'nin tek adımda ayrılması daha ekonomiktir. Yukarıda söz edilen geleneksel yöntemlerde, Li ve Fe'nin ayrı ayrı geri kazanımını sağlamak amacıyla LFP katodunun geri kazanımında aşırı miktarda güçlü asit uygulanmaktaydı. Ancak, seçici liç sürecinde, Li'nin seçici geri kazanımı ve FePO₄'ün yerinde hazırlanması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu uygulama ile LFP, Li⁺ iyonunu serbest bırakır ve kristal yapı için FePO₄'e dönüşür, bu da diğer yöntemlere kıyasla daha az miktarda asit tüketimi ile sonuçlanır. Seçici liç ile geri kazanım işlemi sırasında, geri kazanılan ürünler Li ve FePO₄'tür ve yeni katot malzemesi geliştirmek için geri kazanılan ürünler öncü olarak tekrar geri dönüştürülebilir. Böylece, atık LFP bataryaların kapalı döngü geri dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir [28]. Şekil 8'de atık LFP bataryaların asit liçi yöntemlerinin akım şeması yer almaktadır.

3.2.2.1. İnorganik asit liçi (Inorganic acid leaching)

İnorganik asitler, sahip oldukları özellikler ve düşük reaktif maliyetleri nedeniyle değerli metallerin geri kazanımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Atık LFP bataryaların geri dönüşürülmesine yönelik uygulanan bu teknik, katot malzemelerinden tüm bileşenleri çözmek için sülfürik asit (H₂SO₄) (öncelikle hidrojen peroksit (H₂O₂) ile birleştirilmiş), fosforik asit (H₃PO₄) ve HCl gibi mineral asitlerin kullanımıyla gerçekleştirilir. Bu basamak sonrasında ise, NH₃·H₂O veya NaOH (Tablo 4) kullanılarak kimyasal çöktürme şeklinde bir ayırma prosedürü uygulanmaktadır [31].

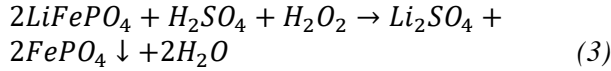


Şekil 8. Atık LFP Bataryaların Asit Liçi (Kaynak [31]’den oluşturulmuştur) (Acid Leaching of Spent LFP Batteries (Created from Source [31]))

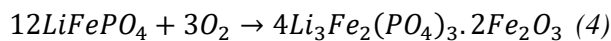
Tablo 4. Atık LFP Katotlarının İnorganik Asitle Liç Yöntemleri (Inorganic Acid Leaching of Spent LFP Cathodes)

Kimyasallar	Deney Koşulları	Li Liç Verimi (%)	Referans
0,28 M H ₂ SO ₄ , Li/H ₂ SO ₄ mol oranı 2,63	85 °C ve 240 dk	98,46	[113]
2,5 mol/L H ₂ SO ₄	K/S oranı 100 g/L, 4 sa ve 60 °C	97,00	[87]
0,28 mol/L H ₂ SO ₄ ve yüksek sıcaklıkta oksidatif aktivasyon	4 sa ve 85 °C	98,46	[114]
2 mol/L H ₂ SO ₄	S/K oranı 20:1, 70 °C ve 2 sa	96,67	[115]
2,7 mol/L H ₂ O ₂	4 sa, 25 °C ve K/S oranı 200 g/L	95,40	[116]
Hacimce %15’lik H ₂ O ₂	K/S oranı 10 g/L	97,60	[117]
4 mol/L H ₂ SO ₄ ve hacimce %2’lik H ₂ O ₂	60 °C	-	[53]
0,3 M H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂ /Li mol oranı 2,07 H ₂ SO ₄ /Li mol oranı 0,57	60 °C ve 120 dk	96,85	[85]
H ₂ SO ₄ ve O ₂ /H ₂ O ₂	2 sa, 80-120 °C ve K/S oranı 100 g/L	>92,00	[118]
Sodyum persülfatın (Na ₂ S ₂ O ₈) teorik miktarının 1,05 katı	25 °C ve 20 dk K/S oranı 300 g/L	99,00	[119]
0,9 mol/L pirofosforik asit (H ₄ P ₂ O ₇)	K/S oranı 100 g/L, 5 sa	97,98	[120]
0,9 M H ₄ P ₂ O ₇	K/S oranı 100 g/L, oda sıcaklığı ve 5 sa	97,98	[121]
0,6 mol/L H ₃ PO ₄ , katot tozu/EDTA-2Na (etilendiamintetraasetik asit disodyum tuzu) oranı 3:1	20 dk, K/S oranı 50 g/L ve mekanokimyasal aktivasyon	94,29	[78]
4 mol/L HCl	Liç öncesi 600 °C’de kalsinasyon	-	[122]
Su, 1 M NaOH, NaOH/Fe mol oranı 4,5	Su liçi için 5 dk, NaOH liçi için oda sıcaklığı ve 30 dk	99,70	[123]

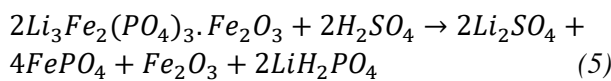
Tablo 4'ten anlaşılacağı üzere H₂SO₄, LFP pillerin seçici liçi için en yaygın kullanılan ajandır. LFP aktif materyali ile H₂SO₄ arasındaki çözünme reaksiyonu, H₂O₂ gibi bir oksitleyici ajanın eklenmesiyle desteklenir [124]. Katot malzemelerinden Fe ve Li'yi geri kazanmak için oksidasyon indirgeme hipotezi uygulanmaktadır. Liç aşaması sırasında H₂O₂, LFP'deki Fe²⁺'yi Fe³⁺'ya oksitleyecek ve oksitlenen ürün fosfat ile birleşerek FePO₄ katı ürününü oluşturacaktır. Liç işlemi sırasındaki reaksiyonlar aşağıdaki şekilde temsil edilebilir [31]:



Rocchett vd. (2013), yüksek sıcaklıkta oksidatif aktivasyon kullanarak atık LFP'lerden büyük ölçekli katot metallere geri kazanımı çalışmalarında, metal liç verimliliğini artıran ve asit tüketimini azaltan süreç ile gözenekli aktif LFP dönüşümü gerçekleştirmiştir. Çalışmada optimum koşullar altında (nLi/nH₂SO₄ = 2,63, 0,28 M H₂SO₄, 240 dk, 85 °C'de), Li'nin seçici liç oranı %98,46 ve lityum fosfat (Li₃PO₄) ve FePO₄'ün geri kazanım oranları %85,5 ve %99,5 olarak bildirildi. Bu araştırmaları ile atık LFP'lerin hızlı, kolay ve karlı bir şekilde geri kazanılması için başarılı bir yöntem sağlayarak LFP'leri endüstriyel kullanıma uygun hale getirdiler [113]. Amorf FePO₄·2H₂O ürünü, bir çözünme-çöktürme yöntemi ile Zheng vd. (2016) tarafından geri kazanılmıştır. Karışımın 2,5 mol/L H₂SO₄ içerisinde liç işlemi sonucu %98 Fe ve %97 Li liç verimi elde edilmiş ve yüzey aktif madde ile FePO₄ çöktürülmüştür. Li, Na₂CO₃ ile çöktürme yoluyla Li₂CO₃ olarak geri kazanılmıştır. Geri kazanılan malzemeler (FePO₄·2H₂O ve Li₂CO₃), bir karbon termal indirgeme yöntemiyle yüksek performanslı LiFePO₄/C'yi sentezlemek için hammadde olarak kullanılmıştır [87]. Tao vd. (2019), oksidatif aktivasyonda, LFP'nin olivin yapısını bozmak için yüksek sıcaklık aktivasyonunun ana kimyasal işlemi kullanılarak liç işlemi desteklenmiştir [114].

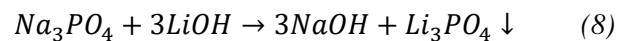
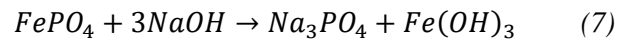
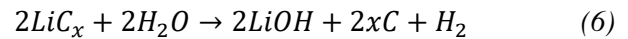


Liç işleminin nihai reaksiyonu denklem (5)'te verilmiştir.



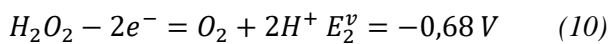
Song vd. (2021)'nin bulguları, atık LFP katot malzemesinin kontrollü deneysel koşullar altında (S/K oranı 20:1, H₂SO₄ derişimi 2 mol/L, 70 °C liç sıcaklığı ve 2 saat liç süresi) asitle liç edilmesinin

aynı zamanda Li için %96,67 ve Fe için %93,25 liç verimine ulaşabileceğini göstermektedir. Geri kazanılan malzeme, yüksek katma değerli LFP katot malzemesi için kısa bir süreçte hidrotermal sentez kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışmada önerilen yöntem, LFP katot malzemesinin geri dönüştürülmesini mümkün kılacaktır. Bileşen kontrolü ve tek adımlı hidrotermal prosedür kullanılarak asit çözeltisinden LFP katot malzemesi başarıyla oluşturulmuştur [115]. Jing vd. (2019) çalışmalarında, oksidan olarak 2,7 mol/L H₂O₂ ve 298 K, pH 7, K/S oranı 200 g/L ile %95,4 Li ekstrakte etmiştir [116]. Bununla birlikte, H₂O₂'nin ekstra bir solvent ile (örneğin genellikle Li liç için kullanılan inorganik asitler) ya da tek başına kullanıldığı deneysel çalışmalar anlaşılır değildir. Olivin yapılı LFP oldukça kararlıdır ve asit konsantrasyonları yüksek olmalıdır. Liç aşamasına H₂O₂ gibi oksitleyici ajanlar eklendiğinde asit konsantrasyonu 2,5 mol/L'den 0,3 mol/L'ye düşürülebilmektedir [87,125]. Anotta bağlı Li'yi geri kazanmak için Fan vd. (2022) tarafından özütleme maddesi olarak H₂O kullanılmış ve bunun sonucunda bir lityum hidroksit (LiOH) sulu çözeltisi olduğu gösterilen Li içeren bir çözelti elde edilmiştir. Fe ve P'yi geri kazanmak için, katot için liç maddesi olarak NaOH çözeltisi kullanılmış ve böylece trisodyum fosfat (Na₃PO₄) çözeltisi içinde süspansiyon edilmiş demir (II) hidroksit ürünü elde edilmiştir. Na₃PO₄ solüsyonu ayrılarak beyaz bir Li₃PO₄ katı ürünü oluşturmak için bir LiOH solüsyonu ile karıştırılmıştır. Bu yöntem NaOH'yi yeniden üreterek kapalı döngü bir FePO₄ liç işlemiyle sonuçlanmıştır. Genel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [117]:

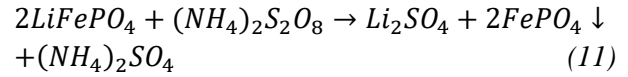


Cai vd. (2014), optimum çalışma koşullarını belirlemek için H₂SO₄ liç çözeltisinden Fe ve Li çöktürme işlemi için ilgili faz diyagramı bölgelerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Geri kazanım için 4 mol/L H₂SO₄ ve hacimce %2'lik H₂O₂ uygulanan liç aşamasının ardından çöktürme işleminde yüksek verimli saf FePO₄'ün geri kazanılması için 2 mol/L NaOH gerekli olduğunu bulmuşlardır [53]. Li vd. (2017), stokiyometrik H₂SO₄ ve H₂O₂ kullanarak (H₂O₂/Li molar oranı 2,07, H₂SO₄/Li molar oranı 0,57) optimum liç koşulları olarak 120 dk boyunca 60 °C'de seçici liç

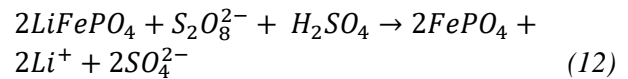
gerçekleştirmiştir. Yapmış oldukları seçici liç işleminde Li için yaklaşık %97, Fe için %0,027 ve P için %2 liç verimliliği ve ayrıca %95,6 Li₃PO₄ katı ürün elde etmişlerdir [85]. Schurmans ve Thijs (2012)'in Umicore patenti, H₂SO₄ ile bir liç aşamasına dayanmaktadır; bir oksitleyici ajan (O₂ veya H₂O₂), Fe'nin sızmasını en aza indirmek için Ag/AgCl'ye karşı en az 200 mV ve tercihen en az 300 mV redoks potansiyelini korumak için eklenir [118]. Zhang vd. (2019), Li'nin katottan deinterkalasyonu için Na₂S₂O₈, Na₂S₂O₈'in teorik miktarının 1,05 katı, 300 g/L K/S oranı, 25 °C, 20 dk koşulları ile LFP'yi FePO₄'e oksitlemek için kullanmışlardır. Li'nin %99'dan fazlası liç edilmiş ve yüksek saflıkta bir Li₂CO₃ (%99,9) doğrudan Na₂CO₃ ilavesiyle geri kazanılmıştır [119]. Liu vd. (2021), H₄P₂O₇ çözeltisini, bir liç maddesi olarak kullanmışlardır. Çözelti içerisindeki LFP liç esnasında PO₄³⁺, Fe²⁺ ve Li⁺ iyonlarını oluşturmuştur. Kalsine edilmemiş katot tozundan Fe ve Li'nin liç verimi sırasıyla %85,61 ve %86,36'dır, ancak 500 °C kalsinasyondan sonra katot tozu için liç verimleri %99,1 ve %97,98 olarak gözlemlenmiştir. Geleneksel liç asitlerine göre metallere karşı daha yüksek liç kapasitesine ve seçiciliğe sahip olan H₄P₂O₇'nin kullanılmasıyla, atık LFP katot malzemelerine eşdeğer iyi elektrokimyasal sonuçlar elde edilmiştir [120]. Qiu vd. (2022), H₂O₂ kullanarak belirli koşullar altında (hacimce %15'lik H₂O₂, K/S oranı 10 g/L, 30 dk boyunca 50 °C) yüksek saflıkta Li₂CO₃ ve FePO₄ elde etmişler ve Li'yi %97,6 liç verimliliği ile liç etmek için bir oksidasyon-liç ajanı olarak kullanmışlardır. Rejenere LFP, çok düşük bir kapasite kaybı ve mükemmel hız performansına ulaşmıştır. Li'nin LFP'den kimyasal olarak ayrılması, oksidatif liç mekanizmasını keşfetmek için kullanılır ve H₂O₂ hem bir oksidan hem de bir indirgeyici olarak işlev görür. H₂O₂'nin bir kısmı Fe(II)'yi oksitlemek için kullanılırken, geri kalanı indirgeme işlemlerinde kullanılır. Sonuç olarak, H₂O₂'nin redoks reaksiyonu aşağıdaki gibidir [121]:



Yang vd. (2017), liç aşaması için EDTA-2Na varlığında 0,6 mol/L seyreltilmiş H₃PO₄ kullanarak 20 dk, K/S oranı 50 g/L koşulları ile liç işlemini gerçekleştirdiler. Mekanokimyasal aktivasyon sonucunda %97,67 Fe ve %94,29 Li geri kazanımı gerçekleştirdiler [78]. Wang vd. (2018) çalışmasında önce kalsinasyon gerçekleştirilmiş, sonrasında elde edilen toz 4 mol/L HCl çözeltisi içinde liç edilmiştir ve Fe(III) iyonlarının FePO₄ olarak çöktürülmesi gerçekleşmiştir. Son olarak, Li₃PO₄ elde etmek için belirli bir miktarda Na₃PO₄ eklemesi yapılmış ve geri kazanılan Li₃PO₄ ve FeSO₄·7H₂O ürünler ile LFP sentezlenmiştir [122]. Diğer yandan, amonyum persülfat ((NH₄)₂SO₄), Fe²⁺'yi Fe³⁺'ya oksitlemek için kullanılır, bu da LFP'nin FePO₄'e dönüştürülmesine neden olur. (NH₄)₂SO₄ ve LFP, bir Li₂SO₄ ve (NH₄)₂SO₄ çözeltisinin yanı sıra FePO₄ katı ürünü oluşturmak için aşağıdaki gibi reaksiyona girer:



LFP katot tozundan Li'nin hızlı ve etkili seçici liçi için yeni bir geri kazanım yöntemi öneren Shentu vd. (2021), 40 °C sıcaklıkta, teorik reaksiyon hacminin 1,1 katı, 1 saat reaksiyon süresi ve 100 g/L K/S oranı ile reaksiyon koşulu oluşturmuştur. LFP malzemeleri, düşük bir H₂SO₄ konsantrasyonu ve bir Na₂S₂O₈/Li molar oranı kullanılarak seçici olarak liç edilmiştir. H₂SO₄ derişiminin düşük olması, Li⁺ liç oranını arttırmak ve deney masraflarını azaltmak açısından çok önemlidir. Reaksiyon denklemi aşağıdaki gibidir [123]:



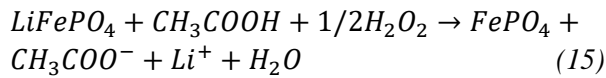
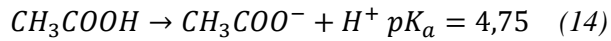
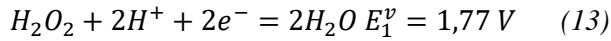
3.2.2.2. Organik asit liçi (Organic acid leaching)

Organik asit liçi, biyolojik olarak parçalanabilirliği, azalan asitliği ve daha az korozyon oluşturması gibi avantajları sebebiyle yaygın ve tercih edilen bir yöntem olarak uygulanmaktadır [113] (Tablo 5). Öte yandan inorganik asitler, SO_x, Cl₂, NO_x gibi zehirli ve aşındırıcı gazlar yayabilmekte ve ikincil kirlenmeyi önlemek için ek atıksu işleme masrafları gerektirmektedir [126].

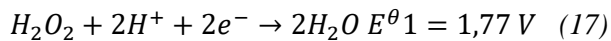
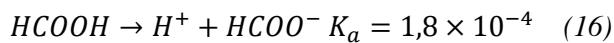
Tablo 5. Atık LFP Katotlarının Organik Asitle Liç Yöntemleri (Organic Acid Leaching of Spent LFP Cathodes)

Katot Malzeme	Kimyasallar	Deney Koşulları	Li Liç Verimi (%)	Referans
LFP	4 M Metansülfonik asit (MSA): % 18 H ₂ O ₂ 4 M P-toluensülfonik asit (TsOH): % 18 H ₂ O ₂	MSA için K/S oranı 80 g/L TsOH için K/S oranı 60 g/L Oda sıcaklığı ve 90 dk	94,00 (MSA ile) 81,00 (TsOH ile)	[102]
	0,8 M Asetik asit (CH ₃ COOH) Hacimce % 6 H ₂ O ₂	K/S oranı 120 g/L 50°C ve 30 dk	>95,05	[58]
	HCOOH/Li mol oranı 3,23 % 10 H ₂ O ₂	K/S oranı %10 30°C ve 30 dk	99,98	[127]
Kavrulmuş aktif maddeler 500 °C'de 2 sa inert gazda	1,5 kat H ₂ SO ₄ dozajı Ağırlıkça %3 askorbik asit (C ₆ H ₈ O ₆)	S/K oranı 4 mL/g 60°C ve 4 sa	>98,00	[128]

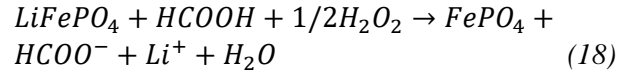
Yadav vd. (2020), geleneksel güçlü asitler yerine MSA ve TSA içinde atık LFP'den Li/Fe'nin %95'in üzerinde liç etkinliğini gözlemlemiştir. Liç sonrası elde edilen ürünler yeni LFP katodu üretmek için kullanılmış ve üretilen katodun elektrokimyasal analizi, iyi bir çevrim kararlılığı ve kapasite göstermiştir [89]. Yang vd. (2018), LFP'nin Li geri kazanımı için H₂O₂ ve CH₃COOH çözeltisi varlığındaki seçici liç işleminde FePO₄ oluştuğunu gözlemlemiştir. CH₃COOH'ın H₂O₂ ve katot parçacıkları ile reaksiyonları aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Çalışmada Li'nin geri kazanım verimliliği %95'in üzerinde ve liç seçiciliği ise %94'lük yüksek bir seçicilikte gözlemlenmiştir. Geri kazanılan Li₂CO₃'ün saflığı, pil sınıfı saflık standardını karşılayarak ağırlıkça %99,95'e ulaşmıştır [58]. Mahandra vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, atık LFP'nin geri dönüşümü için bir liç reaktifi olarak formik asit (HCOOH) kullanılmıştır. HCOOH'ın 25 °C'de iyonlaşması, reaksiyon ortamında H⁺ üretmekte ve H₂O₂, aşağıdaki denklemde gösterilen suya ayrışmaktadır:



Atık katot malzemesinin HCOOH ve H₂O₂ ile reaksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:



Li'nin liç ve geri kazanım verimlilikleri sırasıyla %99,5'in üzerinde ve %99,9 olarak belirtilmiştir. Diğer yandan, Li₃PO₄'ün saflığı %99,5'in üzerinde gözlemlenmiştir. Ek olarak, gerçekleştirilen bu teknik hem ölçeklendirilebilir hem de endüstriyel potansiyele sahiptir [127]. Yang vd. (2021), elektrot parçalarını önce dondurulup sonra kaynatılan suya daldırarak Al folyoyu LFP'den ayırmıştır. Daha sonra, inert atmosfer altında kavurma ve eleme ile tüm katot ve anot aktif maddeleri, Al ve Cu folyolarından kolayca ve verimli bir şekilde ayırmıştır. Aktif malzemeler liç edilmiş (1,5 kat H₂SO₄ dozajı, C₆H₈O₆ = katot malzemesine ağırlıkça %3,4 mL/g S/K oranı, 4 saat ve 60 °C) ve liç çözeltisi FePO₄ ve Li₂CO₃ hazırlamak için kullanılmıştır. Li, Fe ve P için %98'lik geri kazanım ve FePO₄ ve Li₂CO₃ ürünleri elde edilmiştir. Son olarak, karbon termal indirgeme yöntemiyle LiFePO₄/C'yi yeniden sentezlemek için elde ettikleri FePO₄ ve Li₂CO₃ ürünlerini kullanmışlardır [128].

Literatür çalışmaları doğrultusunda organik asitlerin atık LFP bataryalardan Li geri kazanımında liç reaktifleri olarak kullanılmasına dair sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [129-131]. Organik asitlerin maliyetlerinin inorganik asitlere göre daha yüksek olması ve metal-ligand komplekslerinin ön-işlemleri aşamasındaki teknik gereksinimlerin hidrometalurji yönteminde daha fazla olması sonucunda bir sonraki adımda gerçekleştirilecek metal geri kazanım basamağındaki uygulanabilirliğin zorlaşması durumları organik asitlerin atık LFP

bataryalardan Li geri kazanımında uygulandığı çalışmaların az olmasının sebeplerindedir [10].

4. ATIK LFP BATARYALARIN ÇEVRESEL ETKİLERİ (ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SPENT LFP BATTERIES)

LFP bataryalar, diğer bataryalara kıyasla daha az metal içerdiklerinden dolayı nispeten daha az çevresel tehlike oluşturmaktadır. LFP bataryalarından kaynaklanan ana kirlilik kaynağı elektrolittir. Elektrolitte yer alan LiPF_6 ve LiBF_4 'ün kimyasal özellikleri kararsızdır ve suda kolayca her ikisi de oldukça zehirli gazlar olan fosfor pentaflorür ve HF'ye ayrışır [132,133]. Bu nedenle, atık LFP bataryaların çevreye atılması, elektrolitin sızarak çevredeki toprak ve yeraltı suyunun kirlenmesine neden olabilmektedir. Diğer yandan, organik çözücüler ve bunların bozunma ürünleri hava, su ve toprakta kirlilik oluşturabilmektedir [46]. Cu ve diğer potansiyel olarak zehirli metaller çevrede birikerek biyolojik birikim yoluyla organizmalara zarar verebilir. Ayrıca LFP bataryalarındaki P'nin sucül ekosisteme karışması sonucu ötrofikasyon oluşabilmektedir [10].

Atık LFP bataryaların diğer bileşenlerine göre de potansiyel çevresel kirleticileri mevcuttur. LFP KAM'ın geri dönüşümü aşamasında kuvvetli reaksiyonlar gerçekleşmekte ve bunu sonucunda potansiyel Li kirliliği meydana gelmektedir. Anot elektrotundaki grafit ya da karbon malzemelerinin güçlü oksitleyici ile reaksiyona girmesi sonucunda toz kirliliği ya da zehirli madde üretimi meydana gelebilmektedir. Elektrolitlerin aşındırıcı olma, suda HF'ye ayrışabilme, güçlü oksitleyicilerle reaksiyona girebilme ve yanarken zehirli maddeler üretebilme gibi potansiyel risklerinden dolayı F kirliliği oluşabilmektedir. Elektrolit çözücülerin kuvvetli reaksiyonlara girebilme, zehirli ve zararlı gazlar üretebilme ve patlamaya neden olma gibi kimyasal özellikleri sonucunda organik kirlilikler oluşabilmektedir. Buna ek olarak atık bataryaların polipropilen ve polietilen gibi plastik kısımları da yanma sonucunda zehirli gazlara dönüşebilmekte ve organik kirlilik yaratabilmektedir. Son olarak, atık LFP bataryalarında bağlayıcı görevindeki PVDF, HF üretmek için F, H_2SO_4 , güçlü alkali ve alkali metallerle reaksiyona girebilir ve F^- kirliliğine sebep olabilmektedir [134-136].

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA), bir süreç/ürün ile ilgili faydaları değerlendirmek için bir araç olarak kabul

edilebilmektedir. Literatürde, LFP üretimine uygulanan LCA çalışmalarına odaklanan birkaç çalışma vardır [137-140]. Larouche vd. (2020), katot malzemeleri üretiminin süreç maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını karşılaştırmaları sonucu üretim aşamasının enerji etkilerinin kg LFP başına 19-56 MJ arasında olduğunu buldular [124]. Ioakimidis vd. (2019), İspanya'daki akıllı binalarda elektrikli araç LFP bataryalarının birincil kullanım aşamasını ikincil uygulamalarla tamamlayan çalışmaları inceledi. Sonuçlar, aynı amaç ve zaman çerçevesinde kullanılmak üzere yeni LFP batarya üretmek yerine ikincil uygulamalarda mevcut elektrikli araç bataryalarının yeniden kullanılmasının önemli çevresel faydaları olduğunu gösterdi [141].

LIB üretiminden farklı olarak, atık bataryanın geri dönüşüm aşaması çok az çalışmada değerlendirilmiştir [142-144]. Bu LCA çalışmaları, batarya geri dönüşümünden ikincil metal üretiminin birincil kaynaklardan geri kazanıma göre daha az enerji gerektirdiğini ve geri dönüşümün sera gazı emisyonları açısından fayda sağladığını göstermiştir [143]. NMC, NCA ve LFP olmak üzere katot malzemelerinin üretimi ve geri dönüşümü ile ilgili Ciez ve Whitacre (2019) tarafından yapılan çalışmada, sera gazı emisyonların, enerji girdileri ve maliyetler değerlendirilmiştir. Ek olarak, doğrudan geri dönüşüm, pirometalurjik ve hidrometalurjik geri kazanım süreçleri karşılaştırılmış ve bu yöntemlerle geri kazanılmayan herhangi bir malzemenin insinerasyon ile bertaraf edildiği varsayılmıştır [142]. Bu nedenle, bir arıtma sürecinin fizibilitesini ve çevre üzerindeki etkilerini daha iyi değerlendirmek ve böylece teknolojinin ölçeğini büyütmeyi kolaylaştırmak için gerçek LFP geri dönüşüm adımıyla ilgilenen daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

LFP bataryalar, ilk üretimlerinden bu yana LIB endüstrisinde önemli bir pazar payına sahiptir ve kullanımlarının gelecekte daha fazla yaygınlaşması öngörülmektedir. Bu inceleme, teknik zorlukları belirlemek, kaynakların sürdürülebilir kullanımını sağlamak ve çevresel riskleri en aza indirmek için atık LFP bataryaların geri dönüşüm teknolojilerini analiz etmiştir. Bu derlemenin amacı, atık LFP bataryaların geri dönüşüm endüstrisini ilerletmek için ileriye dönük ve bilimsel rehberlik sağlamaktır. Atık LIB'lerin geri dönüşüm yöntemleri incelendiğinde, pirometalurjik geri dönüşüm

yöntemine dayalı küresel geri dönüşüm metotlarının atık LFP bataryaların geri dönüşümü için uygun olmadığı saptanmıştır. Genellikle gövde, plastik bileşenler, ayırıcı, Al folyo, Cu folyo ve en önemlisi siyah kütlelerin parçalanması ve ayrılmasını içeren ön-işlem aşaması ve ayrılmış aktif elektrot malzemelerinin, inorganik veya organik asit liçi ile hidrometalurji metodundan oluşan geri kazanım yöntemleri LFP kimyasına uyarlanabilir yöntemlerdir. Bununla birlikte, yapılan çalışmalara bağlı olarak, atık LFP'lerin hem mekanik hem de hidrometalurjik yöntemleri yalnızca pilot ölçekte test edilmiştir. Geri dönüşüm yönteminin seçimi, kaynakların mevcut miktarına bağlıdır. Değerli ve maliyetli metallerin düşük miktardaki içeriğinden dolayı yöntemlerin ekonomikliği ve sağladıkları fayda atık LFP geri dönüşümü açısından önemli bir engeldir. Sonuç olarak, doğal kaynakların korunumuna yönelik LIB üretiminde temel metal olan Li'nin hidrometalurjik yöntem ile geri kazanılarak üretim için tekrar kullanılması atık LFP geri dönüşümünü ekonomik hale getirme fırsatı sağlayabilir. Bunun yanı sıra, atık LFP'lerin neden olduğu çevresel tehlikeler dikkate alınmalı, gereken sürdürülebilirlik ilkeleri nedeniyle bu tür bataryalar için uygun geri dönüşüm stratejileri geliştirilmeli ve süreçler döngüsel ekonomi ilkelerine göre değerlendirilmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar bu çalışmayı Bilimsel Araştırma Projesi (Proje Numarası: 23LÖT067) ile destekleyen Eskişehir Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

The authors would like to thank Eskişehir Technical University for supporting this study with the Scientific Research Project (Project Number: 23LÖT067).

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)

Bu çalışmada, tüm yazarlar fikrin oluşması ve tasarımına katkıda bulunmuştur.

In this study, all authors contributed to the idea and design.

Gizem AVCI: Makalenin ilk halinin yazılmasına, literatür araştırmasının ve sonuç değerlendirmesinin yapılmasına katkı sunmuştur.

She contributed to this article by writing the first draft, conducting literature research, and assessing the conclusions.

Alp ÖZDEMİR: Makalenin kavramsallaştırılmasına, literatür taramasına, taslak halinin yazılmasına, içerik açısından kontrolüne ve çalışmanın danışmanlığına katkı sunmuştur.

He contributed to the conceptualization, drafting and reviewing of the article, literature research and supervised the study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Thomson, I., & Charnock, R. (2022). Engaging with the IPCC on Climate Finance: A Call to Action and Platform for Social and Environmental Accounting Scholars. *Social and Environmental Accountability Journal*, 42(1-2), 1-10. <https://doi.org/10.1080/0969160X.2022.2085131>
- [2] Mansouri Kouhestani, F., Byrne, J., Johnson, D., Spencer, L., Brown, B., Hazendonk, P., & Scott, J. (2020). Multi-criteria PSO-based optimal design of grid-connected hybrid renewable energy systems. *International Journal of Green Energy*, 17(11), 617-631. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1779072>
- [3] Maiyalagan, T., & Elumalai, P. (Eds.). (2021). *Rechargeable Lithium-ion Batteries: Trends and Progress in Electric Vehicles*. CRC Press.
- [4] Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W. (Eds.). (2015). *Advances in battery technologies for electric vehicles*. Woodhead Publishing.
- [5] Liang, Y., Zhao, C. Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J. Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M. M., Chueh, Y. L., Yu, H. & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. <https://doi.org/10.1002/inf2.12000>
- [6] Butt, A., Ali, G., Tul Kubra, K., Sharif, R., Salman, A., Bashir, M., & Jamil, S. (2022). Recent Advances in Enhanced Performance of Ni-Rich Cathode Materials for Li-Ion Batteries: A Review. *Energy Technology*, 10(3), 2100775. <https://doi.org/10.1002/ente.202100775>

- [7] Steward, D., Mayyas, A., & Mann, M. (2019). Economics and challenges of Li-ion battery recycling from end-of-life vehicles. *Procedia Manufacturing*, 33, 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.033>
- [8] Raj, T., Chandrasekhar, K., Kumar, A. N., Sharma, P., Pandey, A., Jang, M., Jeon, B. H., Varjani, S. & Kim, S. H. (2022). Recycling of cathode material from spent lithium-ion batteries: Challenges and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128312. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128312>
- [9] Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>
- [10] Wang, M., Liu, K., Dutta, S., Alessi, D. S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., & Tsang, D. C. (2022). Recycling of lithium iron phosphate batteries: Status, technologies, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112515>
- [11] Alfaro-Algaba, M., & Ramirez, F. J. (2020). Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104461>
- [12] Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., Chen, R. & Wu, F. (2020). Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects. *Chemical reviews*, 120(14), 7020-7063. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535>
- [13] Fergus, J. W. (2010). Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of power sources*, 195(4), 939-954. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.089>
- [14] Qiao, H., & Wei, Q. (2012). Functional nanofibers in lithium-ion batteries. In *Functional Nanofibers and their Applications* (pp. 197-208). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095640.2.197>
- [15] Forte, F., Pietrantonio, M., Pucciarmati, S., Puzone, M., & Fontana, D. (2021). Lithium iron phosphate batteries recycling: An assessment of current status. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(19), 2232-2259. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1776053>
- [16] Ali, H., Khan, H. A., & Pecht, M. G. (2021). Circular economy of Li Batteries: Technologies and trends. *Journal of Energy Storage*, 40, 102690. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102690>
- [17] Zeng, X., Li, J., & Shen, B. (2015). Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid. *Journal of hazardous materials*, 295, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.064>
- [18] Tan, Q., & Li, J. (2015). Recycling metals from wastes: a novel application of mechanochemistry. *Environmental science & technology*, 49(10), 5849-5861. <https://doi.org/10.1021/es506016w>
- [19] Xu, K. (2004). Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical reviews*, 104(10), 4303-4418. <https://doi.org/10.1021/cr030203g>
- [20] Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z., Wang, Q., Chen, M., Apelian, D., & Wang, Y. (2016). Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes. *Jom*, 68, 2632-2638.
- [21] Buchert, M., & Sutter, J. (2015). *Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien*.
- [22] Crabtree, G., Kócs, E., & Trahey, L. (2015). The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond. *Mrs Bulletin*, 40(12), 1067-1078. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.259>
- [23] Blomgren, G. E. (2016). The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), A5019. [10.1149/2.0251701jes](https://doi.org/10.1149/2.0251701jes)
- [24] Pickett, L., Winnet, J., Carver, D., & Bolton, P. (2021). *Electric vehicles and infrastructure*. House of Commons Library: London, UK.
- [25] Ma, J., Li, Y., Grundish, N. S., Goodenough, J. B., Chen, Y., Guo, L., Peng, Z., Qi, X., Yang, F., Qie, L., Wang, C. A., Huang, B., Huang, Z., Chen, L., Su, D., Wang, G., Peng, X., Chen, Z., Yang, J., He, S., Zhang, X., Yu, H., Fu, C., Jiang, M., Deng, W., Sun, C. F., Pan, Q., Tang, Y., Li, X., Ji, X., Wan, F., Niu, Z., Lian, F., Wang, C., Wallace, G., Fan, M., Meng, Q., Xin, S., Guo, Y. G. & Wan, L. J. (2021). The 2021 battery technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(18), 183001. [10.1088/1361-6463/abd353](https://doi.org/10.1088/1361-6463/abd353)

- [26] Panichello, M. F., & Buschman, T. J. (2021). Shared mechanisms underlie the control of working memory and attention. *Nature*, 592(7855), 601-605.
- [27] Wu, X., Ma, J., Wang, J., Zhang, X., Zhou, G., & Liang, Z. (2022). Progress, Key Issues, and Future Prospects for Li-Ion Battery Recycling. *Global Challenges*, 2200067. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200067>
- [28] Fatima, N., Solangi, N., Safdar, F., & Kumar, J. (2022). A short overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ battery. *North Am. Acad. Res.*, 5(7), 76-87. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6970023>
- [29] Fujita, T., Chen, H., Wang, K. T., He, C. L., Wang, Y. B., Dodbiba, G., & Wei, Y. Z. (2021). Reduction, reuse and recycle of spent Li-ion batteries for automobiles: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 179-192.
- [30] Pradhan, S., Nayak, R., & Mishra, S. (2022). A review on the recovery of metal values from spent nickel metal hydride and lithium-ion batteries. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 4537-4554.
- [31] Kumawat, S., Singh, D., & Saini, A. (2022). Recycling of spent lithium-iron phosphate batteries: toward closing the loop. *Materials and Manufacturing Processes*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2136387>
- [32] Shah, J. Boom in LFP Battery Use on the Way but Not Without Hurdles; Saur Energy International. <https://www.saurenergy.com/opinion/boom-in-lfp-battery-use-on-the-way-but-not-without-hurdles>
- [33] Pathi, A. K., Nanjundaswamy, K. S., & Goodenough, J. B. (1997). Phospho-olivine as positive electrode for rechargeable Lithium-ion batteries. *J Electrochem. Soc*, 144(4), 1188-1194. [10.1149/1.1837571](https://doi.org/10.1149/1.1837571)
- [34] Takahashi, M., Tobishima, S. I., Takei, K., & Sakurai, Y. (2002). Reaction behavior of LiFePO₄ as a cathode material for rechargeable lithium batteries. *Solid state ionics*, 148(3-4), 283-289. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00064-4)
- [35] Yuan, L. X., Wang, Z. H., Zhang, W. X., Hu, X. L., Chen, J. T., Huang, Y. H., & Goodenough, J. B. (2011). Development and challenges of LiFePO₄ cathode material for lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 4(2), 269-284. <https://doi.org/10.1039/C0EE00029A>
- [36] Zhang, Y., Huo, Q. Y., Du, P. P., Wang, L. Z., Zhang, A. Q., Song, Y. H., ... & Li, G. Y. (2012). Advances in new cathode material LiFePO₄ for lithium-ion batteries. *Synthetic Metals*, 162(13-14), 1315-1326. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2012.04.025>
- [37] Xu, B., Qian, D., Wang, Z., & Meng, Y. S. (2012). Recent progress in cathode materials research for advanced lithium ion batteries. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 73(5-6), 51-65.
- [38] Li, J., & Ma, Z. F. (2019). Past and present of LiFePO₄: from fundamental research to industrial applications. *Chem*, 5(1), 3-6. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2012.05.003>
- [39] Liu, W., Liu, H., Liu, W., & Cui, Z. (2021). Life cycle assessment of power batteries used in electric bicycles in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110596>
- [40] SWD. (2018). 36 final, Commission Staff Working Document. Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy.
- [41] Zhang, W. J. (2011). Structure and performance of LiFePO₄ cathode materials: A review. *Journal of Power Sources*, 196(6), 2962-2970. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.113>
- [42] Li, L., Wu, L., Wu, F., Song, S., Zhang, X., Fu, C., Yuan, D. & Xiang, Y. (2017). recent research progress in surface modification of LiFePO₄ cathode materials. *Journal of the Electrochemical Society*, 164(9), A2138. [10.1149/2.1571709jes](https://doi.org/10.1149/2.1571709jes)
- [43] Zheng, J., Hou, Y., Duan, Y., Song, X., Wei, Y., Liu, T., Hu, J., Guo, H., Zhuo, Z., Liu, L., Chang, Z., Wang, X., Zhrebetsky, D., Fang, Y., Lin, Y., Xu, K., Wang, L. W., Wu, Y. & Pan, F. (2015). Janus solid-liquid interface enabling ultrahigh charging and discharging rate for advanced lithium-ion batteries. *Nano letters*, 15(9), 6102-6109. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02379>
- [44] Astafev, E. (2020). Electrochemical noise measurement of a lithium iron (II) phosphate (LiFePO₄) rechargeable battery. *Instrumentation Science & Technology*, 48(1), 75-85. <https://doi.org/10.1080/10739149.2019.1658601>
- [45] Yin-quan, H., He-ping, L., Yi, Z., & Kai-feng, L. (2011). Charging method research for lithium iron phosphate battery. *Procedia Engineering*, 15, 4367-4371. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.820>
- [46] Omar, H., & Rohani, S. (2015). Treatment of landfill waste, leachate and landfill gas: A

- review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 9, 15-32.
- [47] Kumar, J., Neiber, R. R., Park, J., Ali Soomro, R., Greene, W., Ali Mazari, S., Seo, H. Y., Lee, J. H., Shon, M., Chang, D. W. & Yong Cho, K. (2022). Recent progress in sustainable recycling of LiFePO₄-type lithium-ion batteries: Strategies for highly selective lithium recovery. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133993>
- [48] Wang, W., & Wu, Y. (2017). An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.019>
- [49] Elwert, T., Hua, Q. S., & Schneider, K. (2019). Recycling of lithium iron phosphate batteries: Future prospects and research needs. In *Materials Science Forum* (Vol. 959, pp. 49-68). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.959.49>
- [50] Baes, K.; Kolk, M.; Carlot, F.; Merhaba, A.; Ito, Y. Future of Batteries; Arthur d Little. <https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoint/s/future-batteries>
- [51] Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. Comparative Study of Li-Ion Battery Recycling Processes; 2020.
- [52] Sen, P. K. (2015). TT Chen Honorary Symposium on Hydrometallurgy, Electrometallurgy, and Material Characterization, edited by Shije Wang, John E. Dutrizac, Michael L. Free, James Y. Hwang, and Daniel Kim: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2012, 804 Pp., ISBN: 978-1-11829-123-8. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(8), 1051-1052. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.984228>
- [53] Cai, G., Fung, K. Y., Ng, K. M., & Wibowo, C. (2014). Process development for the recycle of spent lithium ion batteries by chemical precipitation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(47), 18245-18259. <https://doi.org/10.1021/ie5025326>
- [54] Chagnes, A., & Pospiech, B. (2013). A brief review on hydrometallurgical technologies for recycling spent lithium-ion batteries. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(7), 1191-1199. <https://doi.org/10.1002/jctb.4053>
- [55] Huang, B., Pan, Z., Su, X., & An, L. (2018). Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*, 399, 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116>
- [56] Li, L., Zhang, X., Li, M., Chen, R., Wu, F., Amine, K., & Lu, J. (2018). The recycling of spent lithium-ion batteries: a review of current processes and technologies. *Electrochemical Energy Reviews*, 1, 461-482.
- [57] Elwert, T., Römer, F., Schneider, K., Hua, Q., & Buchert, M. (2018). Recycling of batteries from electric vehicles. *Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles: battery health, performance, safety, and cost*, 289-321.
- [58] Yang, Y., Meng, X., Cao, H., Lin, X., Liu, C., Sun, Y., Zhang, Y. & Sun, Z. (2018). Selective recovery of lithium from spent lithium iron phosphate batteries: a sustainable process. *Green Chemistry*, 20(13), 3121-3133. <https://doi.org/10.1039/C7GC03376A>
- [59] Zeng, X., Li, J., & Singh, N. (2014). Recycling of spent lithium-ion battery: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(10), 1129-1165. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>
- [60] Or, T., Gourley, S. W., Kaliyappan, K., Yu, A., & Chen, Z. (2020). Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. *Carbon Energy*, 2(1), 6-43. <https://doi.org/10.1002/cey2.29>
- [61] Lv, W.; Wang, Z.; Cao, H.; Sun, Y.; Zhang, Y.; Sun, Z. A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018, 6(2), 1504–1521. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03811>
- [62] Chen, J., Li, Q., Song, J., Song, D., Zhang, L., & Shi, X. (2016). Environmentally friendly recycling and effective repairing of cathode powders from spent LiFePO₄ batteries. *Green Chemistry*, 18(8), 2500-2506. <https://doi.org/10.1039/C5GC02650D>
- [63] Reece, S. M., Sinha, A., & Grieshop, A. P. (2017). Primary and photochemically aged aerosol emissions from biomass cookstoves: chemical and physical characterization. *Environmental science & technology*, 51(16), 9379-9390. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01881>
- [64] Bi, H., Zhu, H., Zu, L., He, S., Gao, Y., & Peng, J. (2019). Combined mechanical process recycling technology for recovering copper and aluminium components of spent lithium-iron phosphate batteries. *Waste Management & Research*, 37(8), 767-780. <https://doi.org/10.1177/0734242X19855432>
- [65] Bi, H., Zhu, H., Zu, L., Gao, Y., Gao, S., & Bai, Y. (2020). Environment-friendly technology for recovering cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries. *Waste Management &*

- Research, 38(8), 911-920.
<https://doi.org/10.1177/0734242X20931933>
- [66] Xiao, J.; Li, J.; Xu, Z. Challenges to Future Development of Spent Lithium Ion Batteries Recovery from Environmental and Technological Perspectives. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54(1), 9–25. DOI: 10.1021/acs.est.9b03725.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03725>
- [67] Nayaka, G. P., Pai, K. V., Manjanna, J., & Keny, S. J. (2016). Use of mild organic acid reagents to recover the Co and Li from spent Li-ion batteries. *Waste management*, 51, 234-238. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.008>
- [68] Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C. & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 147(1-2), 269-281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- [69] Nie, H., Xu, L., Song, D., Song, J., Shi, X., Wang, X., Zhang, L. & Yuan, Z. (2015). LiCoO₂: recycling from spent batteries and regeneration with solid state synthesis. *Green chemistry*, 17(2), 1276-1280. <https://doi.org/10.1039/C4GC01951B>
- [70] Zhong, X., Liu, W., Han, J., Jiao, F., Qin, W., Liu, T., & Zhao, C. (2019). Pyrolysis and physical separation for the recovery of spent LiFePO₄ batteries. *Waste Management*, 89, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.068>
- [71] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *nature*, 575(7781), 75-86.
- [72] Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., Schälicke, G., Loellhoeffel, T., Fölster, A. S., & Kwade, A. (2016). Ecological recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles with focus on mechanical processes. *Journal of the electrochemical society*, 164(1), A6184. [10.1149/2.0271701jes](https://doi.org/10.1149/2.0271701jes)
- [73] Sonoc, A., Jeswiet, J., & Soo, V. K. (2015). Opportunities to improve recycling of automotive lithium ion batteries. *Procedia Cirp*, 29, 752-757. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.039>
- [74] Li, L., Lu, J., Zhai, L., Zhang, X., Curtiss, L., Jin, Y., Wu, F., Chen, R. & Amine, K. (2018). A facile recovery process for cathodes from spent lithium iron phosphate batteries by using oxalic acid. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 4(2), 219-225. [10.17775/CSEEJPES.2016.01880](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2016.01880)
- [75] Li, J., Wang, Y., Wang, L., Liu, B., & Zhou, H. (2019). A facile recycling and regeneration process for spent LiFePO₄ batteries. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 14580-14588.
- [76] Liu, W., Zhong, X., Han, J., Qin, W., Liu, T., Zhao, C., & Chang, Z. (2018). Kinetic study and pyrolysis behaviors of spent LiFePO₄ batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 1289-1299. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04939>
- [77] Song, X., Hu, T., Liang, C., Long, H. L., Zhou, L., Song, W., You, L., Wu, Z. S. & Liu, J. W. (2017). Direct regeneration of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries using a solid phase sintering method. *RSC advances*, 7(8), 4783-4790. [10.1039/C6RA27210J](https://doi.org/10.1039/C6RA27210J)
- [78] Yang, Y., Zheng, X., Cao, H., Zhao, C., Lin, X., Ning, P., Zhang, Y., Jin, W. & Sun, Z. (2017). A closed-loop process for selective metal recovery from spent lithium iron phosphate batteries through mechanochemical activation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9972-9980. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01914>
- [79] Shi, Y., Zhou, X., & Yu, G. (2017). Material and structural design of novel binder systems for high-energy, high-power lithium-ion batteries. *Accounts of chemical research*, 50(11), 2642-2652. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00402>
- [80] Kang, G. D., & Cao, Y. M. (2014). Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes—a review. *Journal of membrane science*, 463, 145-165. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.03.055>
- [81] El Mohajir, B. E., & Heymans, N. (2001). Changes in structural and mechanical behaviour of PVDF with processing and thermomechanical treatments. 1. Change in structure. *Polymer*, 42(13), 5661-5667. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00064-7)
- [82] Gören, A., Costa, C. M., Silva, M. M., & Lanceros-Mendez, S. J. S. S. I. (2016). Influence of fluoropolymer binders on the electrochemical performance of C-LiFePO₄ based cathodes. *Solid State Ionics*, 295, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.07.012>
- [83] He, Y., Yuan, X., Zhang, G., Wang, H., Zhang, T., Xie, W., & Li, L. (2021). A critical

- review of current technologies for the liberation of electrode materials from foils in the recycling process of spent lithium-ion batteries. *Science of The Total Environment*, 766, 142382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142382>
- [84] Jiang, X. T., Wang, P., Li, L. H., Yu, J., Yin, Y. X., & Hou, F. (2019). Recycling process for spent cathode materials of LiFePO₄ batteries. In *Materials Science Forum* (Vol. 943, pp. 141-148). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.943.141>
- [85] Li, H., Xing, S., Liu, Y., Li, F., Guo, H., & Kuang, G. (2017). Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent LiFePO₄ batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 5(9), 8017-8024. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01594>
- [86] Bian, D., Sun, Y., Li, S., Tian, Y., Yang, Z., Fan, X., & Zhang, W. (2016). A novel process to recycle spent LiFePO₄ for synthesizing LiFePO₄/C hierarchical microflowers. *Electrochimica Acta*, 190, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.114>
- [87] Zheng, R., Zhao, L., Wang, W., Liu, Y., Ma, Q., Mu, D., Li, R. & Dai, C. (2016). Optimized Li and Fe recovery from spent lithium-ion batteries via a solution-precipitation method. *Rsc Advances*, 6(49), 43613-43625. <https://doi.org/10.1039/C6RA05477C>
- [88] Bi, H., Zhu, H., Zu, L., Gao, Y., Gao, S., Peng, J., & Li, H. (2021). Low-temperature thermal pretreatment process for recycling inner core of spent lithium iron phosphate batteries. *Waste Management & Research*, 39(1), 146-155. <https://doi.org/10.1177/0734242X20957403>
- [89] Yadav, P., Jie, C. J., Tan, S., & Srinivasan, M. (2020). Recycling of cathode from spent lithium iron phosphate batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123068. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123068>
- [90] Yang, Y., Huang, G., Xu, S., He, Y., & Liu, X. (2016). Thermal treatment process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *Hydrometallurgy*, 165, 390-396. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.025>
- [91] Öhl, J., Horn, D., Zimmermann, J., Stauber, R., & Gutfleisch, O. (2019). Efficient process for Li-ion battery recycling via electrohydraulic fragmentation. In *Materials Science Forum* (Vol. 959, pp. 74-78). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.959.74>
- [92] Kumar, J., Neiber, R. R., Park, J., Soomro, R. A., Greene, G. W., Mazari, S. A., Seo, H. Y., Lee, J. H., Shon, M., Chang, D. W. & Cho, K. Y. (2022). Recent progress in sustainable recycling of LiFePO₄-type lithium-ion batteries: Strategies for highly selective lithium recovery. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133993. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133993>
- [93] Dorella, G., & Mansur, M. B. (2007). A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *Journal of power sources*, 170(1), 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.025>
- [94] Kwon, O. S., & Sohn, I. (2020). Fundamental thermokinetic study of a sustainable lithium-ion battery pyrometallurgical recycling process. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104809>
- [95] Jung, J. C. Y., Sui, P. C., & Zhang, J. (2021). A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments. *Journal of Energy Storage*, 35, 102217. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102217>
- [96] Li, L., Bian, Y., Zhang, X., Yao, Y., Xue, Q., Fan, E., Wu, F. & Chen, R. (2019). A green and effective room-temperature recycling process of LiFePO₄ cathode materials for lithium-ion batteries. *Waste management*, 85, 437-444. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.012>
- [97] Calvo, E. J. (2019). Electrochemical methods for sustainable recovery of lithium from natural brines and battery recycling. *Current Opinion in Electrochemistry*, 15, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.010>
- [98] Lima, M. C. C., Pontes, L. P., Vasconcelos, A. S. M., de Araujo Silva Junior, W., & Wu, K. (2022). Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. *Energies*, 15(6), 2203. <https://doi.org/10.3390/en15062203>
- [99] Castro, F. D., Mehner, E., Cutaia, L., & Vaccari, M. (2022). Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: A feasibility study. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133130>

- [100] Zhang, B., Qu, X., Chen, X., Liu, D., Zhao, Z., Xie, H., Wang, D. & Yin, H. (2022). A sodium salt-assisted roasting approach followed by leaching for recovering spent LiFePO₄ batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127586.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127586>
- [101] Rajaeifar, M. A., Ghadimi, P., Raugei, M., Wu, Y., & Heidrich, O. (2022). Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106144.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106144>
- [102] Zhang, P., Yokoyama, T., Itabashi, O., Suzuki, T. M., & Inoue, K. (1998). Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. *Hydrometallurgy*, 47(2-3), 259-271.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(97\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(97)00050-9)
- [103] Laali, K. K., Greves, W. J., Correa-Smits, S. J., Zwarycz, A. T., Bunge, S. D., Borosky, G. L., Manna, A., Paulus, A. & Chanan-Khan, A. (2018). Novel fluorinated curcuminoids and their pyrazole and isoxazole derivatives: Synthesis, structural studies, Computational/Docking and in-vitro bioassay. *Journal of Fluorine Chemistry*, 206, 82-98.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2017.11.013>
- [104] Hung, S. H., Lin, C. F., Chiang, P. C., Tsai, T. H., & Peng, C. Y. (2014). Recovery of metal ions from spent Lithium Ion Batteries (LIBs) using sodium salts of D2EHPA or P507: Performance evaluation and life cycle assessment. *Res. J. Chem. Environ*, 18, 39-47.
- [105] Kang, J., Senanayake, G., Sohn, J., & Shin, S. M. (2010). Recovery of cobalt sulfate from spent lithium ion batteries by reductive leaching and solvent extraction with Cyanex 272. *Hydrometallurgy*, 100(3-4), 168-171.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.010>
- [106] Lee, J. Y., Pranolo, Y., Zhang, W., & Cheng, C. Y. (2010). The Recovery of Zinc and Manganese from Synthetic Spent-Battery Leach Solutions by Solvent Extraction. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 28(1), 73-84.
<https://doi.org/10.1080/07366290903409043>
- [107] Chan, G. G., Koch, C. M., & Connors, L. H. (2017). Blood proteomic profiling in inherited (ATTRm) and acquired (ATTRwt) forms of transthyretin-associated cardiac amyloidosis. *Journal of Proteome Research*, 16(4), 1659-1668.
<https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.6b00998>
- [108] Sethurajan, M., van Hullebusch, E. D., Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic, B., Leal, J. P., Gasche, T. A., Kucuker, M. A., Kuchta, K., Neto, I. F. F., Soares, H. M. V. M. & Chmielarz, A. (2019). Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes-a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 49(3), 212-275.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>
- [109] Wang, J., & Sun, X. (2012). Understanding and recent development of carbon coating on LiFePO₄ cathode materials for lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5163-5185.
[10.1039/C1EE01263K](https://doi.org/10.1039/C1EE01263K)
- [110] Miao, Y., Liu, L., Zhang, Y., Tan, Q., & Li, J. (2022). An overview of global power lithium-ion batteries and associated critical metal recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 127900.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127900>
- [111] Gunarathne, V., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Alessi, D. S., Selvasembian, R., Naushad, M., You, S., Oleszczuk, P. & Ok, Y. S. (2022). Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(6), 1022-1062.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1847949>
- [112] Ordoñez, J., Gago, E. J., & Girard, A. (2016). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 195-205.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.363>
- [113] Rocchetti, L., Vegliò, F., Kopacek, B., & Beolchini, F. (2013). Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from WEEE residues using a portable prototype plant. *Environmental science & technology*, 47(3), 1581-1588.
<https://doi.org/10.1021/es302192t>
- [114] Tao, S., Li, J., Wang, L., Hu, L., & Zhou, H. (2019). A method for recovering Li₃PO₄ from spent lithium iron phosphate cathode material through high-temperature activation. *Ionics*, 25, 5643-5653.
- [115] Song, Y., Xie, B., Song, S., Lei, S., Sun, W., Xu, R., & Yang, Y. (2021). Regeneration of LiFePO₄ from spent lithium-ion batteries via a facile process featuring acid leaching and

- hydrothermal synthesis.
<https://doi.org/10.1039/D1GC00483B>
- [116] Jing, Q., Zhang, J., Liu, Y., Yang, C., Ma, B., Chen, Y., & Wang, C. (2019). E-pH diagrams for the Li-Fe-P-H₂O system from 298 to 473 K: thermodynamic analysis and application to the wet chemical processes of the LiFePO₄ cathode material. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(23), 14207-14215. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02074>
- [117] Fan, M. C., Zhao, Y., Kang, Y. Q., Wozny, J., Liang, Z., Wang, J. X., Zhou, G. M., Li, B. H., Tavajohi, N. & Kang, F. Y. (2022). Room-temperature extraction of individual elements from charged spent LiFePO₄ batteries. *Rare Metals*, 41(5), 1595-1604.
- [118] Schurmans, M., & Thijs, B. (2012). Process for the Recovery of Lithium and Iron from LFP Batteries. *World Patent WO*, 72619, A1.
- [119] Zhang, J.; Hu, J.; Liu, Y.; Jing, Q.; Yang, C.; Chen, Y.; Wang, C. Sustainable and Facile Method for the Selective Recovery of Lithium from Cathode Scrap of Spent LiFePO₄ Batteries. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7(6), 5626–5631. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b00404. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00404>
- [120] Liu, K., Yang, S., Lai, F., Li, Q., Wang, H., Tao, T., Xiang, D. & Zhang, X. (2021). Application of H₄P₂O₇ as leaching acid in one-step selective recovery for metals from spent LiFePO₄ batteries. *Ionics*, 27, 5127-5135.
- [121] Qiu, X., Zhang, B., Xu, Y., Hu, J., Deng, W., Zou, G., Hou, H., Yang, Y., Sun, W., Hu, Y., Cao, X. & Ji, X. (2022). Enabling the sustainable recycling of LiFePO₄ from spent lithium-ion batteries. *Green Chemistry*, 24(6), 2506-2515. <https://doi.org/10.1039/D1GC04784A>
- [122] Wang, X., Wang, X., Zhang, R., Wang, Y., & Shu, H. (2018). Hydrothermal preparation and performance of LiFePO₄ by using Li₃PO₄ recovered from spent cathode scraps as Li source. *Waste management*, 78, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.029>
- [123] Shentu, H., Xiang, B., Cheng, Y. J., Dong, T., Gao, J., & Xia, Y. (2021). A fast and efficient method for selective extraction of lithium from spent lithium iron phosphate battery. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101569. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101569>
- [124] Larouche, F., Tedjar, F., Amouzegar, K., Houlachi, G., Bouchard, P., Demopoulos, G. P., & Zaghbi, K. (2020). Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-ion batteries and beyond. *Materials*, 13(3), 801. <https://doi.org/10.3390/ma13030801>
- [125] Li, X., Zhang, J., Song, D., Song, J., & Zhang, L. (2017). Direct regeneration of recycled cathode material mixture from scrapped LiFePO₄ batteries. *Journal of Power Sources*, 345, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.118>
- [126] Kumari, A., Jha, M. K., Lee, J. C., & Singh, R. P. (2016). Clean process for recovery of metals and recycling of acid from the leach liquor of PCBs. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4826-4834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.018>
- [127] Mahandra, H., & Ghahreman, A. (2021). A sustainable process for selective recovery of lithium as lithium phosphate from spent LiFePO₄ batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105883. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105883>
- [128] Yang, C., Zhang, J. L., Jing, Q. K., Liu, Y. B., Chen, Y. Q., & Wang, C. Y. (2021). Recovery and regeneration of LiFePO₄ from spent lithium-ion batteries via a novel pretreatment process. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 1478-1487.
- [129] Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., & Rashchi, F. (2018). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 418-435. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.024>
- [130] Zeng, X., Li, J., & Shen, B. (2015). Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid. *Journal of hazardous materials*, 295, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.064>
- [131] He, L. P., Sun, S. Y., Mu, Y. Y., Song, X. F., & Yu, J. G. (2017). Recovery of lithium, nickel, cobalt, and manganese from spent lithium-ion batteries using L-tartaric acid as a leachant. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(1), 714-721. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02056>
- [132] Wang, Q., Sun, J., Chu, G., Yao, X., & Chen, C. (2007). Effect of LiPF₆ on the thermal behaviors of four organic solvents for lithium ion batteries. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 89(1), 245-250. <https://doi.org/10.1007/s10973-006-7534-1>

- [133] Wiemers-Meyer, S., Jeremias, S., Winter, M., & Nowak, S. (2016). Influence of battery cell components and water on the thermal and chemical stability of LiPF₆ based lithium ion battery electrolytes. *Electrochimica acta*, 222, 1267-1271.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.100>
- [134] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B. E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- [135] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Mellander, B. E. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 271, 414-420.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>
- [136] Peng, Y., Yang, L., Ju, X., Liao, B., Ye, K., Li, L., Cao, B. & Ni, Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO₄ cathode. *Journal of hazardous materials*, 381, 120916.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120916>
- [137] Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158-168. 10.1039/C4EE03029J
- [138] Liang, Y., Su, J., Xi, B., Yu, Y., Ji, D., Sun, Y., Cui, C. & Zhu, J. (2017). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions. *Resources, conservation and recycling*, 117, 285-293.
- [139] Oliveira, L., Messagie, M., Rangaraju, S., Sanfelix, J., Rivas, M. H., & Van Mierlo, J. (2015). Key issues of lithium-ion batteries—from resource depletion to environmental performance indicators. *Journal of cleaner production*, 108, 354-362.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.021>
- [140] Xie, J., Gao, F., Gong, X., Wang, Z., Liu, Y., & Sun, B. (2018). Life cycle assessment of LFP cathode material production for power lithium-ion batteries. In *Advances in Energy and Environmental Materials: Proceedings of Chinese Materials Conference 2017 18th* (pp. 513-522). Springer Singapore.
- [141] Ioakimidis, C. S., Murillo-Marrodán, A., Bagheri, A., Thomas, D., & Genikomsakis, K. N. (2019). Life cycle assessment of a lithium iron phosphate (LFP) electric vehicle battery in second life application scenarios. *Sustainability*, 11(9), 2527.
<https://doi.org/10.3390/su11092527>
- [142] Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2(2), 148-156.
- [143] Ellingsen, L. A. W., Hung, C. R., & Strømman, A. H. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 82-90.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>
- [144] Nordelöf, A., Poulidikou, S., Chordia, M., Bitencourt de Oliveira, F., Tivander, J., & Arvidsson, R. (2019). Methodological approaches to end-of-life modelling in life cycle assessments of lithium-ion batteries. *Batteries*, 5(3), 51.
<https://doi.org/10.3390/batteries5030051>
- [145] USGS (2023) Mineral Commodity Summaries 2023. United States Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
- [146] Kelleher Environmental, 2019. Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles.
- [147] Duehnen, S., Betz, J., Kolek, M., Schmuch, R., Winter, M., & Placke, T. (2020). Toward green battery cells: Perspective on materials and technologies. *Small Methods*, 4(7), 2000039.
<https://doi.org/10.1002/smt.202000039>
- [148] Windisch-Kern, S., Gerold, E., Nigl, T., Jandric, A., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Scherhauser, B., Raupenstrauch, H., Pomberger, R., Antrekowitsch, H. & Part, F. (2022). Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. *Waste management*, 138, 125-139.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.038>
- [149] Sommerville, R., Zhu, P., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., Goodship, V., & Kendrick, E. (2021). A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105219.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219>
- [150] Celep, O., Yazıcı, E. Y., Deveci, H., & Dorfling, C. (2023). Recovery of lithium, cobalt and other metals from lithium-ion batteries. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(4), 384-400.

AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında minimum miktarda yağlamamanın (MMY) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılması

Selçuk YAĞMUR^{1*} 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 19/10/2023
Revision: 30/10/2023
Accepted: 04/11/2023

Anahtar Kelimeler

AISI 1050
Tornalama
MMY
Kesme Kuvveti
Yüzey Pürüzlülüğü

Article Info

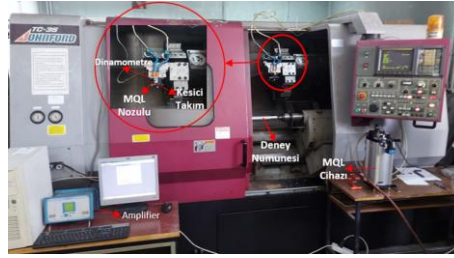
Araştırma makalesi
Başvuru: 19/10/2023
Düzeltilme: 30/10/2023
Kabul: 04/11/2023

Keywords

AISI 1050
Turning
MQL
Cutting Force
Surface Roughness

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada AISI 1050 çeliği üç farklı kesme hızı (340, 400 ve 460 m/dak) ve iki farklı ilerleme miktarında (0,2 ve 0,3 mm/dev) tornalanmasında kesme şartlarının etkisi araştırılmıştır. Deneyler kuru kesme koşulunda ve 90, 150 ve 200 ml/saat minimum miktarda yağlama (MMY) akış hızında gerçekleştirilmiştir. / In this study, the effect of cutting conditions on turning AISI 1050 steel at three different cutting speeds (340, 400 and 460 m/min) and two different feed rates (0,2 and 0,3 mm/rev) was investigated. MQL flow rate of 90, 150 and 200 ml/h.



Şekil A: Deney düzeneği / Figure A: Experimental setup

Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışmada MMY yönteminde akış hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. / In this study, the effects of flow rate on cutting forces and surface roughness in the MQL method were investigated.
- Deneyler sonrasında MMY'nin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür. / After the experiments, it was seen that MQL had a positive effect on cutting forces and surface roughness.
- Kesme hızı artışının yüzey kalitesini ve kesme kuvvetlerini olumlu etkilediği görülmüştür. / It has been observed that increasing the cutting speed positively affects the surface quality and cutting forces.

Amaç (Aim): AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında MMY yönteminde akış hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. / It was aimed to investigate the effects of flow rate on cutting forces and surface roughness in the MQL method in turning AISI 1050 steel.

Özgünlük (Originality): Talaşlı imalatta sıklıkla kullanılan AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında MMY yönteminin oldukça az kullanıldığı görülmüştür. Bu sebeple bu çalışmada imalat sektöründe sıklıkla kullanılan AISI 1050 çeliğin MMY yöntemi ile tornalanmasında farklı akış hızlarının kesme kuvvetleri ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. / It has been observed that the MQL method is used very little in turning AISI 1050 steel, which is frequently used in machining. For this reason, in this study, the effects of different flow rates on cutting forces and average surface roughness values were investigated in turning AISI 1050 steel, which is frequently used in the manufacturing industry, with the MQL method.

Bulgular (Results): Çalışma sonrasında MMY kullanımının kesme kuvvetlerinin düşürdüğü görülmüştür. Aynı zamanda MMY kullanımı ile birlikte yüzey kalitesi de artmıştır. Akış hızının artması başlangıçta kesme kuvvetlerini düşürmüştü ve yüzey kalitesini arttırmıştır. Fakat sonrasında akış hızı artışının etkisi azalmıştır. / After the study, it was seen that the use of MQL reduced the cutting forces. At the same time, surface quality has increased with the use of MQL. Increasing the flow rate initially reduced the cutting forces and increased the surface quality. But afterwards, the effect of the flow rate increase decreased.

Sonuç (Conclusion): En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 460 m/dak kesme hızında, 0,2 mm/dev ilerleme miktarında, 200 ml/saat akış hızında 1,42µm olmuştur. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ise yine 460 m/dak kesme hızında 0,3 mm/dev ilerleme kuru kesme şartlarında 4,01 µm olarak ölçülmüştür. / The lowest average surface roughness value was 1.42µm at a cutting speed of 460 m/min, feed rate of 0.2 mm/rev, and flow rate of 200 ml/hour. The highest average surface roughness value was measured as 4.01 µm under dry cutting conditions with a feed rate of 0.3 mm/rev at a cutting speed of 460 m/min.



AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında minimum miktarda yağlamanın (MMY) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlüğü üzerindeki etkisinin araştırılması

Selçuk YAĞMUR^{1*}

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/10/2023
Düzeltilme: 30/10/2023
Kabul: 04/11/2023

Anahtar Kelimeler

AISI 1050
Tornalama
MMY
Kesme Kuvveti
Yüzey Pürüzlülüğü

Öz

Geleneksel soğutma yöntemlerinin gerek insan sağlığına gerekse çevreye vermiş olduğu zararlardan dolayı kullanımı son yıllarda oldukça azalmıştır. Bu soğutma yönteminin yerine daha çevreci, ekonomik ve geleneksel soğutma yöntemlerine göre insan sağlığı açısından olumsuzluk yaratmayacak olan soğutma yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada AISI 1050 çeliği üç farklı kesme hızı (340, 400 ve 460 m/dak) ve iki farklı ilerleme miktarında (0,2 ve 0,3 mm/dev) tornalanmasında kesme şartlarının etkisi araştırılmıştır. Deneysel kuru kesme koşulunda ve 90, 150 ve 200 ml/saat minimum miktarda yağlama (MMY) akış hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonrasında kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının ortalama yüzey pürüzlüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen değerler doğrultusunda minimum miktarda yağlama uygulamasının ve akış hızı artışının kesme kuvvetlerini ve ortalama yüzey pürüzlüğü değerlerini olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. En düşük ortalama yüzey pürüzlüğü değeri 1,42 µm olarak elde edilmiştir. En düşük kesme kuvveti ise 1084 N olarak ölçülmüştür.

Investigation of the effect of minimum quantity lubrication (MQL) on cutting forces and surface roughness in turning of AISI 1050 steel

Article Info

Research article
Received: 19/10/2023
Revision: 30/10/2023
Accepted: 04/11/2023

Keywords

AISI 1050
Turning
MQL
Cutting Force
Surface Roughness

Abstract

The use of traditional cooling methods has decreased significantly in recent years due to the harm they cause to both human health and the environment. Instead of this cooling method, a cooling method that is more environmentally friendly, economical and will not cause any negative effects on human health compared to traditional cooling methods has started to be used. In this study, the effect of cutting conditions on turning AISI 1050 steel at three different cutting speeds (340, 400 and 460 m/min) and two different feed rates (0,2 and 0,3 mm/rev) was investigated. MQL flow rate of 90, 150 and 200 ml/h. After the experiments, the effects of cutting parameters and cutting conditions on average surface roughness and cutting forces were examined. In line with the obtained values, it was concluded that the minimum amount of lubrication application and the flow rate increase positively affected the cutting forces and average surface roughness values. The lowest average surface roughness value was obtained as 1,42 µm. The lowest cutting force was measured as 1084 N.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalatta arttan verimlilik ihtiyacı beraberinde yüksek kesme hızlarının kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Yüksek kesme hızlarının kullanımı ile birlikte bazı sorunlarda ortaya çıkmıştır [1]. Kesme hızlarının artması kesme bölgesi sıcaklıklarının da artmasına sebep olmaktadır. Kontrol edilemeyen kesme bölgesi sıcaklığı takım ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir [2,3].

Bununla beraber kesme kuvvetlerinin artması ve yüzey kalitesinin olumsuz etkilenmesi gibi sonuçları da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple kesme esnasında meydana gelen sıcaklığının kontrol edilebilmesi için alternatif soğutma yöntemleri üzerinde araştırmalar yapılmaya başlanmıştır.

Özellikle geleneksel soğutma gibi yöntemlerin gerek insan sağlığı gerekse çevre açısından bazı

dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca ömrünü tamamlayan soğutucu sıvı geri dönüşümü ek zaman ve maliyet gerektirmektedir [4,5].

Kesme işlemlerinde geleneksel soğutma işlemlerinin bu dezavantajları sebebiyle Minimum Miktarla Yağlama (MMY) gibi daha az miktarda soğutucu ile soğutma yapılan işlemler tercih edilmeye başlanmıştır. MMY yöntemi, basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine püskürtülen yağın iş parçası ve kesici takım arasında bir yağ filmi oluşturarak soğutma temeline dayalıdır [6].

Carvalho ve diğerleri, AISI 1050 çeliğin tornalanmasında bitkisel ve mineral esaslı kesme sıvıları kullanmışlardır. Deneylerde iki bitkisel bazlı ve bir mineral bazlı kesme sıvısı kullanmışlardır. Deneyler sonrasında iki bitkisel bazlı kesme sıvısının mineral bazlı kesme sıvısına göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [7]. Carvalho ve diğerleri, AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında bitkisel bazlı kesme sıvılarının performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada, (A) bitkisel bazlı emülsiyon, (B) mineral bazlı yarı sentetik, (C) bitkisel bazlı sentetik olacak şekilde üç farklı soğutma sıvısı kullanmışlardır. Deneyler sonrasında (A) bitkisel bazlı emülsiyonun üç konsantrasyonda da en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu ve en iyi yağlayıcı özelliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır [8]. Abegunde ve diğerleri, Taguchi tabanlı gri ilişki analizi yaklaşımı kullanılarak AISI 1045 çeliğin tornalanmasında yağlayıcı olarak seçilen bazı bitkisel yağların performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada üç farklı yağlayıcı bitkisel yağ kullanmışlardır. Kesme bölgesi sıcaklığı açısından genel olarak en iyi performansı hurma çekirdeği yağının gösterdiğini aktarmışlardır. [9]. Khalil ve diğerleri, AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında Al₂O₃ nano yağlayıcı ile Sodyum Dodesilbenzen Sülfonat (SDBS)'nin işlenişinde takım aşınmasını araştırmışlardır. Çalışmada, kuru; nano yağlayıcı ve SDBS yüzey aktif maddeli nano yağlayıcı performansı araştırılmıştır. Deneyler sonrasında Al₂O₃ nano yağlayıcı ile yüzey aktif maddenin takım aşınmasını olumlu yönde etkilediğini ifade etmişlerdir [10]. Sarıkaya ve Güllü, AISI 1050 malzemesinin MMY altında tornalanmasında optimum kesme parametrelerini Taguchi yöntemi ve tepki yüzey metodolojisi ile araştırmışlardır. Deneyleri kuru, geleneksel soğutma ve MMY altında gerçekleştirmişlerdir. İki farklı MMY akış hızı kullanmışlardır (60 ml/saat ve 120 ml/saat). Optimum parametrelerin 120 ml/saat akış hızı, 200 m/dak kesme hızı ve 0,007 mm/dev ilerleme miktarı olduğunu söylemişlerdir [11]. Farklı malzemelerin tornalanmasında MMY yönteminin sıklıkla

kullanıldığı görülmektedir. Yücel ve diğerleri, AA 2024 T3 alaşımının MoS₂ bazlı nanoakışkanın işleme özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deneyleri üç farklı kesme şartı altında (kuru, MMY, nanoakışkanlı MMY) gerçekleştirmişlerdir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi değerlere nanoakışkanlı MMY ile yapılan deneylerde ulaşmışlardır. Ayrıca kesme hızı ve ilerleme miktarının artması ile ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı sonucuna varmışlardır [12]. Yıldırım, sertleştirilmiş AISI 420 malzemesinin tornalanmasında kriyojenik soğutma ile nanoakışkan bazlı MMY'in performansını karşılaştırmıştır. Çalışmada üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı kullanmıştır. Deneyler sonrasında, ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından nanoakışkan bazlı MMY şartlarında daha iyi sonuçların alındığını vurgulamıştır [13].

Literatürde, deneysel çalışmaların yanında matematiksel modelleme ve optimizasyon çalışmaları da mevcuttur. Singh ve diğerleri, saf titanyum alaşımının tornalanmasında evrimsel algoritmalar kullanılarak işleme özelliklerini kullanmışlardır. Çalışmada soğutma koşulları olarak MMY ve RHVT yöntemini kullanmışlardır. ANOVA tarafından oluşturulan matematiksel modellere göre deneysel sonuçların istatistikî sonuçlar ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. [14]. Musavi ve diğerleri AA 2024 alaşımının farklı soğutma şartları altında tornalanmasında yanıt yüzey metodolojisi (YYM) kullanılarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Çalışmada modellerin yüksek doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür [15].

Literatür değerlendirildiğinde, tornalama işlemlerinde MMY yönteminin oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sıklıkla araştırılan konular arasında yer almaktadır. Bununla beraber talaşlı imalatla sıklıkla kullanılan AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında MMY yönteminin oldukça az kullanıldığı görülmüştür. MMY yönteminin daha çok Al alaşımlarının işlenmesinde yoğunlukta kullanıldığı görülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada imalat sektöründe sıklıkla kullanılan AISI 1050 çeliğin MMY yöntemi ile tornalanmasında farklı akış hızlarının kesme kuvvetleri ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS MATERYAL VE METOD)

Tornalama deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Johnford TC35 CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kesici takım olarak Sandvik marka CNMG 120412-QM kodlu kesici takım kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme

parametreleri literatür taraması ve kesici takım firmasının tavsiye ettiği değerler arasından seçilmiştir. Deneylerde üç farklı kesme hızı, iki farklı ilerleme miktarı ve sabit kesme derinliği değerleri kullanılmıştır. Deneyler kuru şartlarda ve üç farklı akış hızında MMY yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve kesme şartları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve kesme şartları (Cutting parameters and cutting conditions used in the experiments)

Kesme Hızı (m/dak)	340	400	460	
İlerleme (mm/dev)	0,2	0,3		
Kesme Şartı	Kuru	90 ml/saat	150 ml/saat	200 ml/saat
Kesme Derinliği (mm)	2			

Deney numunesi olarak günümüzde imalat sanayinde sıklıkla kullanılan AISI 1050 mazlemesi tercih edilmiştir. Deney numunesinin boyu 400 mm çapı ise 60 mm'dir. Deneylerde kullanılan AISI 1050 malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmiştir. Kesme esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin ölçümü için Kistler 9257

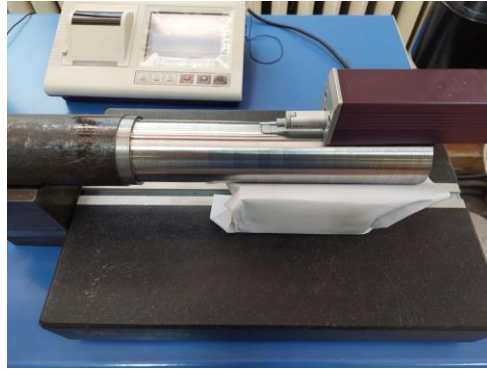
dinamometre ve Kistler 5070 amplifier kullanılmıştır. MMY uygulaması için SKF LubriLeanBasic model MMY cihazı kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak çeliklerin işlenmesine uygunluğu üretici firma ratabından belirtilmiş SKF marka OEL5-Lubrioil yağ kullanılmıştır. MMY sisteminin basıncı 4 bar olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 2. AISI 1050 çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of AISI 1050 steel)

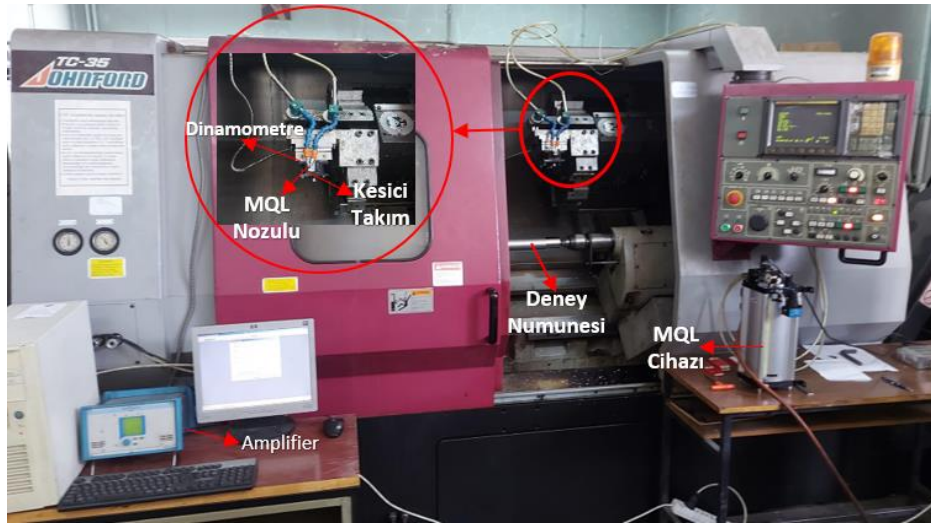
Malzeme	C	Si	Mg	P	S	Fe
AISI 1050	0,45	15	60	0,04	0,04	Kalan

Deneyler sonrasında tornalanmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü için Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçme uzunluğu 5.6 mm olarak belirlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için tornalanmış yüzeylerin dört farklı bölgesinden

ölçümler alınmıştır. Ölçülen bu dört yüzey pürüzlülüğü değerinin aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü Şekil 1'de ve deney düzeneği Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (Surface roughness measurement)



Şekil 2. Deney düzeneği (Experimental setup)

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

bağlı olarak değişen kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

AISI 1050 malzemesinin tornalanmasında kesme parametreleri ve MMY uygulamasında akış hızına

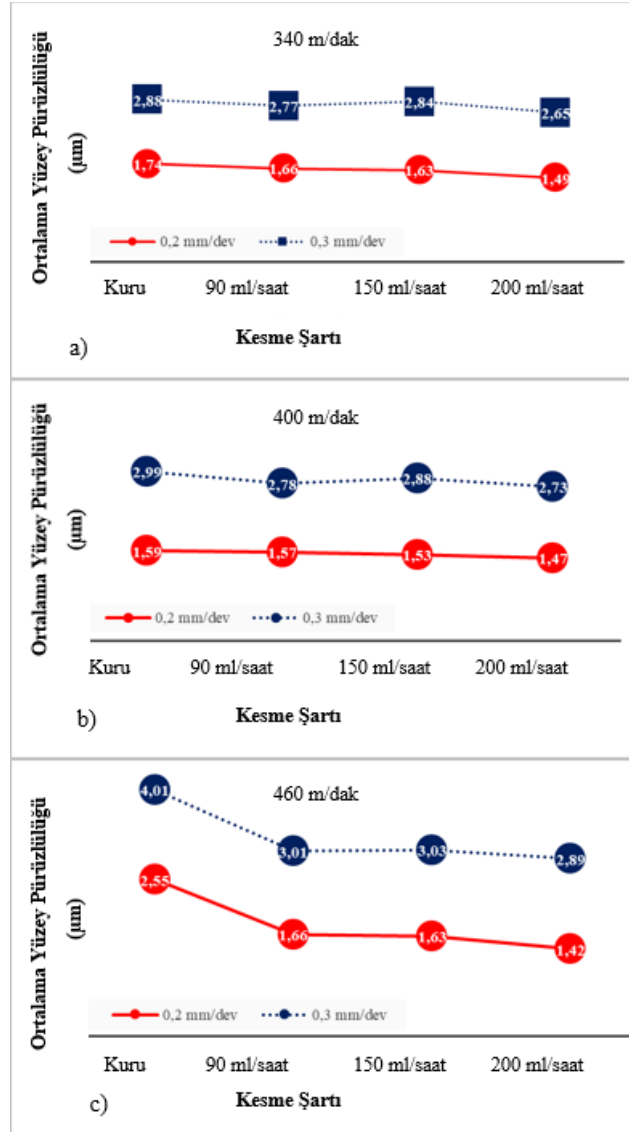
Tablo 3. Kesme parametrelerine bağlı olarak meydana gelen kesme kuvvetleri ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Cutting forces and average surface roughness values depending on cutting parameters)

Deney No	Kesme Şartı	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Fz (N)	Raort (µm)
1	Kuru	340	0,2	1124	1,74
2			0,3	1598	2,88
3		400	0,2	1123	1,59
4			0,3	1583	2,99
5		460	0,2	1230	2,55
6			0,3	1690	4,01
7	MMY 90 ml/saat	340	0,2	1134	1,66
8			0,3	1570	2,77
9		400	0,2	1128	1,57
10			0,3	1559	2,78
11		460	0,2	1097	1,66
12			0,3	1565	3,01
13	MMY 150 ml/ saat	340	0,2	1097	1,63
14			0,3	1559	2,84
15		400	0,2	1090	1,53
16			0,3	1538	2,88
17		460	0,2	1090	1,63
18			0,3	1530	3,03
19	MMY 200 ml/ saat	340	0,2	1100	1,49
20			0,3	1537	2,65
21		400	0,2	1088	1,47
22			0,3	1530	2,73
23		460	0,2	1084	1,42
24			0,3	1520	2,89

3.1. YüzeY Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Kesme parametreleri ve kesme şartlarına göre değişen ortalama yüzeY pürüzlülük değerleri Şekil 3'deki grafiklerde verilmiştir. Şekil 3'deki grafikler incelendiğinde artan kesme hızlarının ortalama yüzeY pürüzlülük değerlerini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Talaşlı imalatta artan kesme hızlarının kesme bölgesi sıcaklığını arttırdığı bilinmektedir. Kesme hızının artması kesme işlemini nispeten kolaylaştırdığı ve bu durumda iş parçası yüzeY kalitesini olumlu etkilemiştir. [16]. Ayrıca yumuşak ve sünek malzemelerin düşük ve orta kesme hızlarında işlenmesi ile yığıntı talaş oluşumu meydana gelmektedir. Yığıntı talaş oluşumu talaşlı imalatta önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kesme esnasında meydana gelen yığıntı talaşın kesici takıma yapışması ile yüzeY pürüzlülüğü değerleri olumsuz yönde etkilenmektedir [17]. Kesme hızının artırılması ile birlikte yüzeY pürüzlülüğü değerlerinin azalması literatürde karşılaşılan bir durumdur [18, 19]. Bu duruma, artan kesme hızlarının yığıntı talaş oluşumunun önüne geçmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca MMY kullanımı ile birlikte yağlama etkisi ile birlikte takım talaş yüzeYi arasından bir filmi tabakası meydana gelmektedir. Bu film tabakası kesme kesnasında meydana gelen talaşların daha hızlı ve daha kolay uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bu durumda MMY kullanımı ile yığıntı talaş oluşumunun önüne nispeten geçileceğini söylemek mümkündür. Yığıntı talaş oluşumunun önüne geçilmesi yüzeY pürüzlülüğü açısından önemli bir etkiye sahiptir



Şekil 3. Kesme şartlarına göre ortalama yüzeY pürüzlülüğü değerlerinin değişimi (Change in average surface roughness values according to cutting conditions)

a) V= 340 m/dak

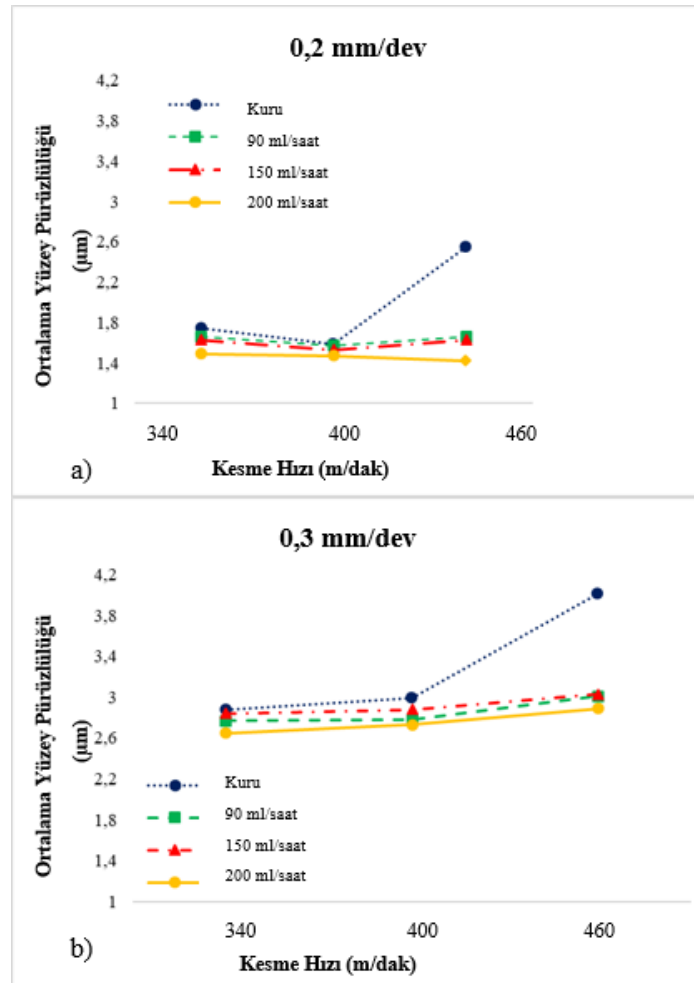
b) V= 400 m/dak

c) V= 460 m/dak

Grafikte artan akış hızı ile birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine kuru kesme şartlarında 460 m/dak kesme hızında ve 0,3 mm/dev ilerleme miktarına ulaşılmıştır. Kuru kesme şartlarında meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerinin MMY uygulamasının kullanılması ile birlikte düşme eğilimine girdiği görülmektedir. Kuru kesme şartlarından MMY kullanımına geçiş ile birlikte özellikle yüksek kesme hızında oldukça belirgin bir şekilde düşüş meydana gelmiştir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri kuru kesme şartlarında 4.01 μm olarak elde edilmiştir. Akış

hızının değişimi ile birlikte genel olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri olumlu olarak etkilenmiş fakat bu etkilenme kuru kesme şartından MMY uygulanmasına geçişteki kadar yüksek oranda olmamıştır.

Her iki ilerleme miktarında da kuru kesme şartlarında kesme hızının 340 m/dak'dan 400 m/dak'a çıkması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri bir düşüş göstermiştir. Fakat kesme hızının 460 m/dak olmasıyla beraber her iki ilerleme miktarında da ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 4'te verilen grafiklerde açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Kesme hızına göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişimi (Change in average surface roughness values according to cutting speed)

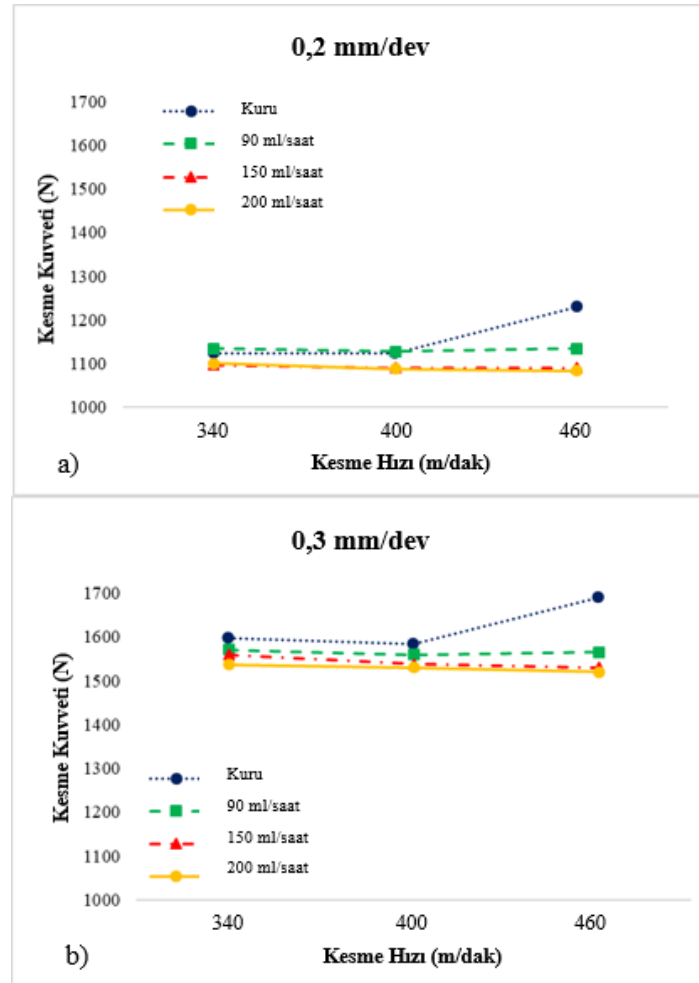
a) $f = 0,2$ mm/dev b) $f = 0,3$ mm/dev

MMY yöntemi kullanılarak yapılan deneylerde ise 460 m/dak kesme hızında her üç akış hızında da ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde kuru kesme şartındaki artış meydana gelmezken askine yüzey pürüzlülüğü değerlendirilinde azalma eğilimi devam etmektedir. Kesici takım aşınmasında en önemli parametrelerden birisi kesme hızıdır. Artan kesme hızları ile birlikte kesici takım aşınmalarının meydana geldiği pek çok çalışmada görülmektedir [20, 21]. Takım talaş arayüzeyinde artan sürtünme dolayısıyla takım kenarının keskinliği kaybolur. MMY yönteminde ise yağlama etkisi ile hem kesme bölgesi sıcaklığı düşer hemde talaş tahliyesi kolaylaşır. Şekil 4'te verilen grafiklerde 460 m/dak kesme hızında kuru şartlarda takım aşınması olduğu düşünülürken farklı akış hızları ile MMY kullanarak bu aşınmanın önüne geçildiği düşünülmektedir [22-24].

3.2. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation Of Cutting Forces)

Şekil 5'te kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve kesme şartlarına göre değişimi verilmiştir. Genel olarak artan kesme hızları ile birlikte kesme kuvvetlerinde bir düşüşten söz etmek mümkün. Artan kesme

hızları ile kesme bölgesi sıcaklığının arttığı ve bunun sonucu olarak plastik deformasyonun kolaylaştığı bilinmektedir. Ayrıca literatürde bu durum artan kesme hızı ile birlikte kesici takım ile talaş temas alanının azalması ile de açıklanmaktadır [25, 26]. Kesme hızının artışı ile kesme kuvvetleri düşerken kesme hızının 460 m/dak'a çıkması ile birlikte kuru kesme şartlarında kuvvetlerde bir artış söz konusu olmuştur. Bu durum her iki ilerleme miktarı için de geçerlidir. Yüzey pürüzlülük değerlerinde olduğu gibi 460 m/dak kesme hızında kuvvet artışına takım aşınmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Kesme hızının takım aşınması açısından önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda kesme hızının artışı ile birlikte bir noktaya kadar kesme kuvvetlerinde düşüş yaşadığı görülürken, kesme hızının yüksek değerlere ulaşması ile arttığı görülmüştür [27]. MMY kullanılması, kesme bölgesi sıcaklığının düşürülmesi özellikle yapışma ve difüzyon aşınma türlerinin azaltılmasına yardımcı olmuştur [28]. Yağlamanın takım ömrü açısından olumlu sonuçları olduğuna literatürde sıklıkla rastlanılmaktadır [29-31].



Şekil 5. Kesme hızına göre kesme kuvvetlerinin değerlerinin değişimi (Change in cutting force values according to cutting speed)

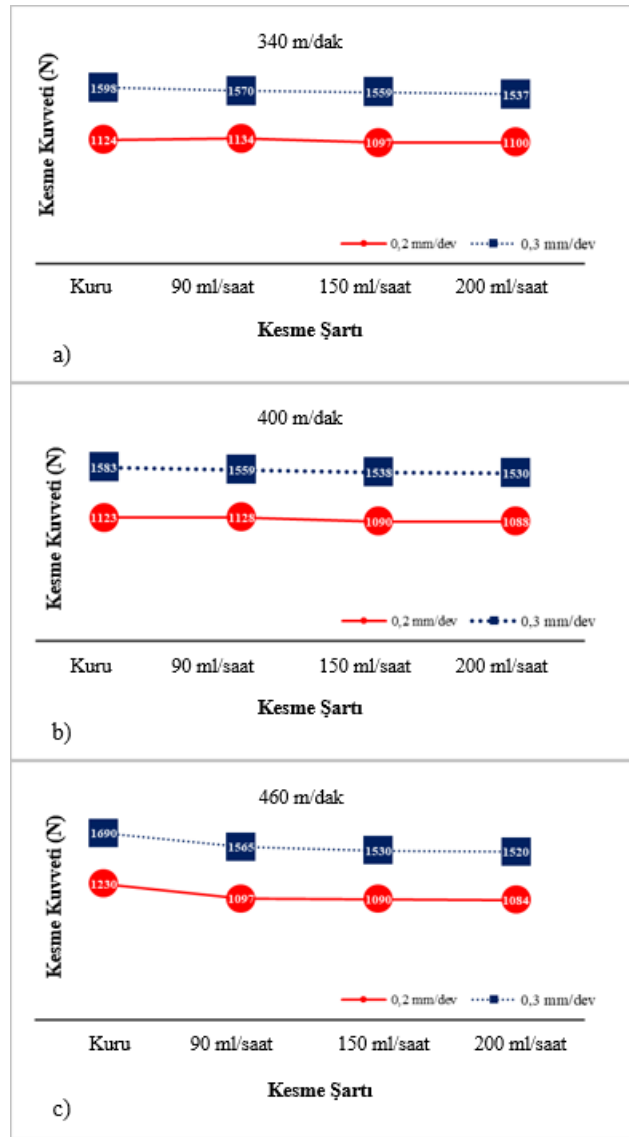
a) $f = 0,2 \text{ mm/dev}$ b) $f = 0,3 \text{ mm/dev}$

Artan ilerleme miktarı tüm kesme koşullarında kesme kuvvetlerini arttırmıştır. Bu duruma artan ilerleme ile birlikte artan talaş kesitinin yol açtığı düşünülmektedir [32]. Aynı zamanda artan ilerleme miktarının kesme kuvvetlerinin artışına sebep olması literatürde takım talaş temas uzunluğunun artması ve bunun da talaş yükünü arttırması ile açıklanmıştır [33].

Şekil 6'da artan akış hızı ile birlikte kesme kuvvetlerinin değişimi görülmektedir. Genel olarak artan akış hızının kesme kuvvetleri üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylemek mümkündür. Fakat akış hızının artması ile birlikte kesme kuvvetleri arasından büyük farklılık meydana gelmemiştir. Bu durumu MMY ile soğutma yönteminde sınır

yağlama şartı ile açıklanabilir. Sınır yağlamada önemli bir husus efektif yağlama miktarıdır [34]. Yani MMY ile birlikte takım talaş ara yüzeyinde bir film tabakası meydana gelmiştir. Akış hızının artması ile birlikte bu yağlama etkisi artmıştır. Fakat bir süre sonra sınır yağlama şartına ulaşıldığı için akış hızının etkisi azalmaya başlamıştır [35].

En düşük kesme kuvveti 1084 N ile 460 m/dak kesme hızı 0,2 mm/dev ilerleme miktarında 200ml/saat akış hızında meydana gelmiştir. En yüksek kesme kuvveti ise kuru kesme şartlarında 460 m/dak kesme hızında ve 0,3 dev/dak ilerleme miktarında 1690 N olarak meydana gelmiştir.



Şekil 6. Kesme şartlarına göre ortalama kesme kuvvetlerinin değişimi (Change of average cutting forces according to cutting conditions)

a) V= 340 m/dak

b) V= 400 m/dak

c) V= 460 m/dak

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin ve MMY uygulamasındaki farklı akış hızlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Genel olarak kesme hızlarının artması ile birlikte kesme kuvvetlerinde ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.
- 460 m/dak kesme hızında her iki ilerleme miktarında da kuru kesme şartlarında kesme kuvvetleri ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri artarken, MMY uygulaması ile birlikte bu durum yaşanmamıştır.
- Artan ilerleme miktarlarının hem kesme kuvvetini hemde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırdığı görülmüştür.
- En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 460 m/dak kesme hızında, 0,2 mm/dev ilerleme miktarında, 200 ml/saat akış hızında 1,42µm olmuştur. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ise yine 460 m/dak kesme hızında 0,3 mm/dev ilerleme kuru kesme şartlarında 4,01 µm olarak ölçülmüştür.
- En düşük kesme kuvveti; 200 ml/saat akış hızında 460 m/dak kesme hızında ve 0,2 mm/dev ilerleme miktarında 1084 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise 1690 N olarak kuru kesme şartlarında meydana gelmiştir.
- MMY kullanımı hem kesme kuvvetini hem de ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini olumlu yönde etkilemiştir.

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)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Çakır A, Kavak N, Şeker U. Sürdürülebilir Üretim İçin Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının Geri Dönüşümü. Mühendis ve Makina. 58 (684) (2017) 15-30.
- [2] Özçatalbaş Y, Baş A. Tornalamada Hava Püskürtme İle Soğutmanın Kesme Kuvvetleri Ve Takım Ömrüne Etkilerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 21(3) (2006) 451-455.
- [3] Yılmaz B, Karabulut Ş, Güllü A. Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters. Journal of Manufacturing Processes. 32 (2018) 553-563.
- [4] Gürkan D, Yaşar S.A, Uzun G, Korkut İ. Vorteks Soğutma Yönteminin Talaşlı İmalat Yöntemleri Ve Kesme Parametrelerine Göre İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 8(3) (2020) 730-745.
- [5] Nguyen T, Zhang C. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. Journal of Materials Processing Technology. 140.1-3 (2003) 224-230.
- [6] Çakır A. (2015) AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara
- [7] Almeida Carvalho D.O, da Silva L.R.R, da Souza F.C.R, França P.H.P, Marcado A.R, Costa E.S, Fernandes G.H.N, da Silva R.B. Flooding Application of Vegetable- and Mineral-Based Cutting Fluids in Turning of AISI 1050 Steel. Lubricants. 10 (11):309 (2022) 1-22.
- [8] Almeida Carvalho D.O, da Silva L.R.R, Mandis A.C. Impact of charging electric vehicles in residential grid on the power losses and voltage plan. 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). (2014) 1-4.
- [9] Abegunde P.O, Kazeem I. Akande I.G, Ikumapayi O.M, Adebayo A.S, Jen T.C, Akinlabi E.T. Performance assessment of some selected vegetable oils as lubricants in turning of AISI 1045 steel using a Taguchi-based grey relational analysis approach.

- Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces. 17(3) (2023) 187-202
- [10] Khalil A.N.M, Ali M.A.M, Azmi A.L. Effect of Al₂O₃ Nanolubricant with SDBS on Tool Wear During Turning Process of AISI 1050 with Minimal Quantity Lubricant. *Procedia Manufacturing*, 2 (2015) 10-134.
- [11] Sarıkaya M, Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*. 65 (2014) 604-616.
- [12] Yücel A, Yıldırım Ç.V, Sarıkaya M, Şirin Ş, Kıvak T, Kumar M.G, Ítalo V.T. Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 15 (2021) 1688-1704.
- [13] Yıldırım Ç.V. Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL. *Tribology International*. 144 (2020) 1-16.
- [14] Singh G, Pruncu C.I, Gupta M.K, Mia M, Khan A.M, Jamil M, Pimenov D.Y, Sen B, Sharma V.S. Investigations of Machining Characteristics in the Upgraded MQL-Assisted Turning of Pure Titanium Alloys Using Evolutionary Algorithms. *Materials*. 12 (2019) 1-17.
- [15] Musavi S.H, Davoodi B, Eskandari B. Evaluation of surface roughness and optimization of cutting parameters in turning of AA2024 alloy under different cooling-lubrication conditions using RSM method. *J. Cent. South Univ*. 27 (2020) 1714–1728.
- [16] Darshit R, Shah N.P, Hiren G, Bhavesh P. Investigation of cutting temperature, cutting force and surface roughness using multi-objective optimization for turning of Ti-6Al-4 V (ELI). *Materials Today: Proceedings*. 50, Part 5, (2022) 1379-1388.
- [17] Özlü B. Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 36:3 (2021) 1241-1251.
- [18] Demir H. The effects of microalloyed steel pre-heat treatment on microstructure and machinability, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 35 (2008) 1041-1046.
- [19] Akgün M, Demir H, Çiftçi İ. Optimization of surface roughness in turning Mg₂Si particle reinforced magnesium alloys. *Journal of Polytechnic*. 21 (3) (2018) 645-650.
- [20] Yağmur S, Pul M. Al 6061/B4C/GNP Hibrit Kompozitin İşlenmesinde Takım Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*. 14 (2) (2022) 816-828.
- [21] Verma N, Vettivel S.C, Rao P.S, Zafar S. Processing tool wear measurement using machine vision system and optimization of machining parameters of boron carbide and rice husk ash reinforced AA 7075 hybrid composite. *Mater. Res. Express*, 6(8) (2019).
- [22] Özbek O, Saruhan H. The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(3) (2020) 2762-2772.
- [23] Khatri A, Jahan M.P, Aouici H. Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions. *Procedia Manufacturing*. 26 (4) (2018) 434-445.
- [24] Saha S, Deb S, Pratim P, Bandyopadhyay P. Progressive wear based tool failure analysis during dry and MQL assisted sustainable micro-milling. *International Journal of Mechanical Sciences* 212 (2021) 1-23.
- [25] Özlü B. Sleipner soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli üzerine etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 36 (3) (2021) 1241-1252.
- [26] Özlü B, Demir H, Türkmen M. The Effect of Mechanical Properties and the Cutting Parameters on Machinability of AISI 5140 Steel Cooled at High Cooling Rates After Hot Forging. *Politeknik Dergisi*. 22 (4) (2019) 879-887.
- [27] Altın A, Nalbant M, Taskesen A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. *Materials & Design*. 28(9) (2007) 2518-2522.
- [28] Dhar N.R, Kamruzzaman M, Mahiuddin A. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 172(2) (2006) 299-304.
- [29] 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. *Int J Adv Manuf Technol* 116 (2021) 821–833.
- [30] Çakıroğlu R. Machinability Analysis of Inconel 718 Superalloy with AlTiN-Coated

- Carbide Tool Under Different Cutting Environments. Arab J Sci Eng. 46 (2021) 8055–8073.
- [31] Su Y, Gong L, Li B, Liu Z, Chen D. Performance evaluation of nanofluid MQL with vegetable-based oil and ester oil as base fluids in turning. Int J Adv Manuf Technol. 83 (2015) 2083–2089.
- [32] Çiftçi İ, Gökçe H. Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 34 (1) (2019) 201-213.
- [33] Rahim E.A, Ibrahim M.R, Rahim A.A, Aziz S, Mohid Z. Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique. Procedia CIRP. 26 (2015) 351-354.
- [34] Gürbüz H, Gönülaçar Y.E. Farklı Kesme Parametreleri ve MQL Debilerinde Elde Edilen Deneysel Değerlerin S/N Oranları ve YSA ile Analizi. Politeknik Dergisi. 24 (3) (2021) 1093-1107.
- [35] Ji X, Li B, Zhang X, Liang S.Y. The Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Machining Force, Temperature, and Residual Stress. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15(11) (2014) 2443-2451.

A Novel Broadband Filtenna with using SRR and DGS for Wireless Communication Applications

Galip Orkun ARICAN^{1*}, Mert KARAHAN²

¹ASELSAN Inc., Communication and Information Technologies Division, Ankara, Türkiye

²National Defence University, Turkish Military Academy, Department of Electronics and Communication Engineering, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 28/05/2023
Accepted: 08/08/2023

Keywords

Filtenna
Broadband Antenna
5G
Microstrip Antenna
DGS

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 28/05/2023
Kabul: 08/08/2023

Anahtar Kelimeler

Filtenna
Genişbant Anten
5G
Mikroşerit Anten
KZY

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a broadband and high-gain filtenna is developed and the effects of the different substrates on the design examined. / Bu çalışmada geniş bantlı ve yüksek kazançlı bir filtenna geliştirilerek farklı alt tabakaların tasarım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

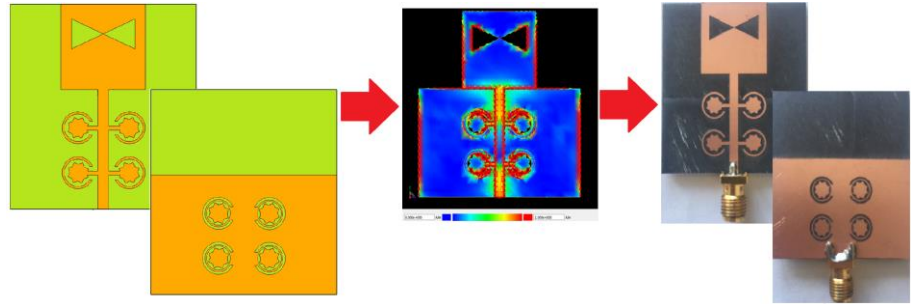


Figure A: Design and prototype of a novel filtenna /Şekil A: Yenilikçi bir filtenna tasarımı ve üretimi

Highlights (Önemli noktalar)

- The effects of split ring resonator (SRR) on the filtering performance of the proposed design have been investigated. / Ayrık halka rezonatörünün (AHR) önerilen tasarımın filtreleme performansına etkileri incelenmiştir.
- The effects of defected ground structures (DGS) on the operating frequency bandwidth of the proposed design have been investigated. / Kusurlu zemin yapısının (KZY) önerilen tasarımının çalışma frekans bantgenişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.
- The effects of the four different dielectric substrates (Rogers RT5880, RO3003, RO4003, and RT6006) on the electrical performance of the design have been investigated. / Dört farklı dielektrik alt tabakanın (Rogers RT5880, RO3003, RO4003, and RT6006) önerilen tasarımının elektriksel performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to enhance the bandwidth and antenna gain with utilizing SRR and DGS methods by introducing a novel filtenna design. In addition, the effects of the different substrates on the same design are examined. / Bu çalışmada, yenilikçi bir filtenna tasarımı ortaya konarak AHR ve KZY yöntemleri kullanılarak bant genişliği ve anten kazancının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ek olarak, aynı tasarımın farklı alt tabakalardaki etkileri incelenmiştir.

Originality (Özgünlük): A novel filtenna design has been investigated with utilizing a bow-tie slot-loaded patch antenna with a four-pole lowpass filter structure on the feedline for the first time. / Besleme hattında ilk kez dört kutuplu alçak geçiren filtre yapısına sahip, papyonlu ve yuva-yüklemeli bir yama anten tasarımı incelenmiştir.

Results (Bulgular): The prototyped filtenna has a center frequency of 3.9 GHz and an operating frequency bandwidth of 2.86 to 4.89 GHz, which yields a fractional bandwidth of 52%. In addition, the filtenna has a reflection coefficient better than -10 dB and the measured maximum antenna gain was 3.26 dBi. / Prototiplenen filtenna 3,9 GHz'lik bir merkez frekansına ve 2,86 ila 4,89 GHz'lik bir kesir bant genişliği sağlamaktadır. Ek olarak, filtennanın yansımaya katsayısı -10 dB'den iyidir ve ölçülen en yüksek anten kazancı 3,26 dBi'dir.

Conclusion (Sonuç): This study shows that a compact size, low-cost, and high performance filtenna can be developed with utilizing SRR and DGS methods for 5G applications. / Bu çalışma, 5G uygulamaları için AHR ve KZY yöntemleri kullanılarak kompakt boyutlu, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir filtenna geliştirilebileceğini göstermektedir.



A Novel Broadband Filtenna with using SRR and DGS for Wireless Communication Applications

Galip Orkun ARICAN^{1*} , Mert KARAHAN² 

¹ASELSAN Inc., Communication and Information Technologies Division, Ankara, Türkiye

²National Defence University, Turkish Military Academy, Dept. of Electrical and Communication Engineering, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 28/05/2023
Accepted: 08/08/2023

Keywords

Filtenna
Broadband Antenna
5G
Microstrip Antenna
DGS

Abstract

This paper presents a novel broadband filtering antenna (filtenna) design for 5G applications. The filtenna structure consist of a bow-tie slot-loaded patch antenna with a four-pole lowpass filter structure on the feedline. In addition, the defected ground structure method was applied to miniaturize the size and widen the operating frequency bandwidth. The proposed filtenna was designed and optimized with using Keysight's PathWave EM Design (EMPro) software. In addition, the filtenna design was analyzed with utilizing four different substrates, which are Rogers RT5880, RO3003, RO4003, and RT6006, and the electromagnetic simulation results were presented. Moreover, the design was manufactured with using Rogers RT5880 and the design was validated with measurements. The developed filtenna operates at a center frequency of 3.9 GHz and an operating frequency bandwidth of 2.86 to 4.89 GHz, which yields a fractional bandwidth of 52%. Furthermore, the filtenna has a reflection coefficient better than -10 dB and the measured maximum antenna gain was 3.26 dBi. The filtenna has a compact size of $0.463\lambda_0 \times 0.506\lambda_0$ where λ_0 is the wavelength at the center frequency. With its compact size, low-cost, and high-performance characteristics, the proposed filtenna can be used for 5G applications.

Kablosuz İletişim Uygulamaları için AHR and KZY Kullanan Yenilikçi bir Geniş bant Filtenna

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 28/05/2023
Kabul: 08/08/2023

Anahtar Kelimeler

Filtenna
Genişbant Anten
5G
Mikroşerit Anten
KZY

öz

Bu makalede, 5G uygulamaları için yeni bir geniş bant filtre anten (filtenna) tasarımı incelenmiştir. Filtenna yapısı, besleme hattında dört kutuplu alçak geçişli filtre yapısına sahip, papyonlu, yuva-yüklü bir yama antenden oluşur. Ayrıca tasarımın boyutunu küçültmek ve çalışma frekansı bant genişliğini genişletmek için kusurlu zemin yapısı yöntemi uygulanmıştır. Önerilen filtre anteni, Keysight'in PathWave EM Design (EMPro) yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve optimizasyonları yapılmıştır. Ek olarak, filtenna tasarımı Rogers RT5880, RO3003, RO4003 ve RT6006 olmak üzere dört farklı alt tabaka için simülasyonları yapılmış ve elde edilen elektromanyetik simülasyon sonuçları sunulmuştur. Önerilen filtenna tasarımı Rogers RT5880 kullanılarak üretilmiş ve tasarlanan filtenna yapısı ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Geliştirilen filtennanın 3,9 GHz merkez frekansında çalıştığı ve 2,86 ila 4,89 GHz çalışma frekansı bant aralığında çalışarak %52'lik kesirli bant genişliği sağladığı görülmüştür. Ayrıca, filtre anteni -10 dB'den daha iyi bir yansıma katsayısına sahiptir ve ölçülen maksimum anten kazancı 3,26 dBi'dir. Filtenna kompakt bir boyuta $0,463\lambda_0 \times 0,506\lambda_0$ sahiptir; burada λ_0 , merkez frekanstaki dalga boyudur. Önerilen filtenna, kompakt boyutu, düşük maliyeti ve yüksek performans özellikleriyle 5G uygulamalarında kullanılabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The pursuing growth in the utilization of communication systems sets a great demand on the utilization of compact and multifunctional systems [1, 2]. With the increasing reliance on wireless

communication applications, there is a need for innovative solutions that can provide both efficient filtering and radiation characteristics while maintaining a compact form factor and cost-effectiveness [3-6]. The RF front-end systems,

which are crucial components in receivers and transmitters, typically consist of an antenna, filter, and amplifier. Traditionally, these components have been implemented separately, leading to larger physical sizes and increased costs. However, the emergence of multifunctional modules has attracted significant attention in recent years due to their ability to integrate multiple functionalities within a compact design.

In this context, the combination of the antenna and filter, known as a filtenna, provides an alternative solution to conventional microwave solutions by offering both filtering and radiating characteristics in a single module. The filtenna stands apart from traditional methods where the antenna and filter are implemented separately. By integrating these components into a single unit, the filtenna eliminates the need for multiple parts and complicated connections. This integration not only reduces the physical size of the system but also simplifies the manufacturing process. As a result, the filtenna offers enhanced overall system performance, making it an attractive solution for wireless communication applications [7].

Over the past few decades, various filtenna design topologies and techniques have been investigated. Each of the filtenna design topologies and techniques has advantages and disadvantages over the others. The electrical performance of the filtenna can be categorized in terms of bandwidth, selectivity, gain, efficiency, polarization, etc. [8]. So as to enhance the radiation and electrical performance of the filtenna, a variety of filtenna design topologies such as multilayer printed circuit board (PCB), split ring resonator (SRR), slot-loaded, diode-loaded, probe-fed and defected ground structures (DGS) have been proposed in the literature [9-15]. The selection of the dielectric substrate material and its properties, like the thicknesses of the dielectric and conductive material, have a significant effect on the performance of the design. On the other hand, the selection of the dielectric material and its properties is a crucial challenge since there is a trade-off between high performance and low-cost in the design process. In the literature, a variety of microstrip filtenna designs on different dielectric substrates with different design methods have been proposed [16-28]. In light of these facts, it is a charming topic for the designers to develop a compact filtenna with high performance to integrate into wireless communication systems.

In this article, a novel broadband filtenna design, which is comprised of a bow tie slot loaded path

antenna with a four-pole lowpass filter structure on the feedline, is proposed for 5G applications. The proposed filtenna utilizes four resonators and each resonator has an eight-edge star-shaped open stub that is surrounded by a circular open loop split ring resonator (SRR) to achieve the filtering characteristic. In addition, DGS was utilized to accomplish wider bandwidth, enhanced selectivity, and compact size. Moreover, the proposed study examines four different dielectric substrates for the same layout to analyze the effects of the dielectric substrates on the performance of the filtenna. Furthermore, the proposed filtenna accomplishes a fractional bandwidth (FBW) of 58.9% (2.67-4.89 GHz) with a reflection coefficient of -10 dB and a maximum antenna gain of 3.26 dBi. The developed filtenna is evitable for the 5G applications with its compact-size, low-cost, and high-performance characteristics.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Filtenna Design (Filtenna Tasarımı)

The filtenna structure is designed to feature a patch antenna with enhanced electrical performance, accompanied by an antenna feed line that incorporates a low-pass filter configuration. In the first step of the design process, the patch antenna design was taken into consideration. To design the patch antenna, the initial dimensions were calculated based on Equations 1-3 [29],

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \tag{Eq.1}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right] \tag{Eq.2}$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left[\frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right] \tag{Eq.3}$$

where W and L are the width and length of the patch antenna, f_0 is the resonant frequency, ϵ_r is the relative permittivity of the dielectric substrate, h is the thickness of the dielectric substrate, ϵ_{eff} is the effective dielectric constant and c is the speed of light (3×10^8 m/s).

In the patch antenna design, the width and length of the patch were calculated as 30.8 mm and 25.08 mm, respectively, for a resonant frequency of 3.9 GHz. However, conventional patch antennas

typically exhibit a narrow frequency bandwidth. To eliminate this limitation by increasing the bandwidth, a bow-tie slot was etched into the patch antenna, and the location and dimensions of the bow-tie were optimized. In addition, a Rogers RT5880 dielectric substrate with a relative permittivity of 2.2 was used in the design so as to enhance the efficiency and bandwidth performance of the patch antenna. Moreover, a microstrip feed line was designed with a four-pole low-pass filter (LPF) to suppress the unwanted harmonics at the upper frequency spectrum. The proposed LPF consisted of four resonators, each featuring an eight-edge star-shaped open stub surrounded by a circular open-loop split ring resonator (SRR). The inclusion of these SRR units in the proposed design enhanced the out-of-band harmonic suppression level. Furthermore, the defected ground structure (DGS) method was employed on the ground plane to

introduce parallel RLC circuit into the antenna feed network. This method ensures a slow-wave impact on the design which enables miniaturizing the circuit size and increasing the frequency bandwidth. Meanwhile, it was revealed that the DGS unit provides a sharp roll at the higher cut-off frequency. The filtenna design comprised a monopole bow-tie slot loaded patch antenna and a feed line with a four-pole LPF. By incorporating DGS units with SRR structures, the size of the patch antenna was reduced to 16.2x16.2 mm², which is 66.03% smaller than the conventional patch size. Additionally, the filtenna has a compact size of 0.463λ₀ x 0.506λ₀ where λ₀ represents the wavelength at the center frequency. Figure 1 illustrates the proposed filtenna layout design, and Table 1 depicts the dimensions of the proposed filtenna layout design.

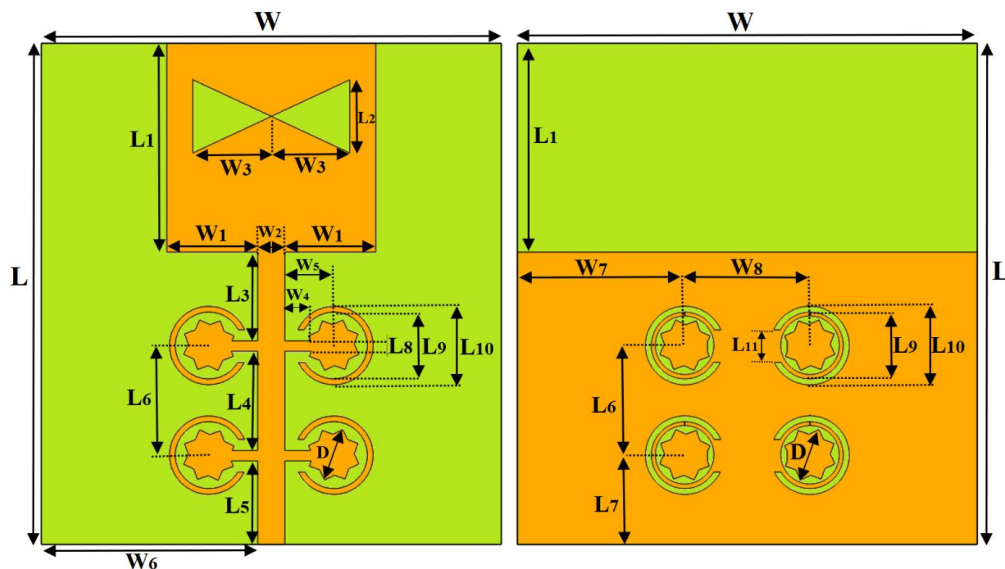


Figure 1. Layout of the proposed Filtenna (a) Top, (b) Bottom (Önerilen Filtennanın serimi (a) Üst, (b) Alt)

Table 1. Dimensions of the proposed filtenna (Önerilen Filtennanın boyutları)

Parameter	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀
Value	38880	16200	5670	6885	7695	6480	8505	6885	810	5186	6088
Parameter	L ₁₁	W	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	D
Value	2529	35640	7050	2100	6075	1998	3816	16770	12954	9732	4175

In the layout design process, a variety of DGS structures have been tried in the design and the proposed filtenna design has been applied on the layout because of both having a novel structure and enhanced electrical characteristics. In addition, the proposed layout design was simulated with different dielectric substrates to analyze the effects of the dielectric substrates on the performance of the filtenna. During the EM simulations, the

dimensions of the proposed filter remained constant, and the simulations were conducted using commercially available dielectric substrates; Rogers RT5880 ($\epsilon_r=2.2$), RO3003 ($\epsilon_r=3.0$), RO4003 ($\epsilon_r=3.55$) and RT6006 ($\epsilon_r=6.15$), respectively. In addition, the chosen thicknesses of the dielectric substrates were similar to one another. The 3D EM simulations were performed with Keysight's PathWave EM Design (EMPro) software.

According to the simulation results, the proposed filter design on the RT5880 has a reflection coefficient better than 10 dB in the frequency bandwidth of 2.67-4.89 GHz, which yields a fractional bandwidth (FBW) of 58.9%. In addition, the reflection coefficient of the proposed filtenna achieves -20 dB at the center resonant frequency of 3.9 GHz. Notably, in the simulation results, it was observed that the reflection coefficient deteriorates with increasing dielectric permittivity and center frequency. Furthermore, as the dielectric permittivity increases, the center frequency of the filtenna shifts to the lower frequencies, and the bandwidth becomes narrower. Figure 2 illustrates

the reflection coefficient of the proposed filtenna with different dielectric substrates.

Figure 3 illustrates the simulated antenna gain of the proposed filtenna using different dielectric substrates. The simulation results revealed that the operating frequency bandwidth of the filtenna becomes narrower as the dielectric permittivity increases. Additionally, it was observed that the filtenna achieves better suppression levels as the dielectric permittivity decreases. Notably, the simulated maximum antenna gain of 3.37 dBi was achieved when utilizing the RT5880 dielectric substrate.

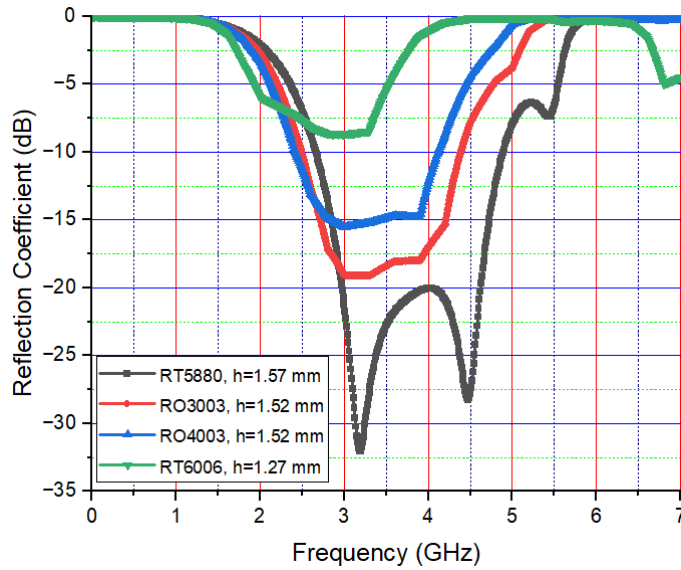


Figure 2. Simulated reflection coefficients with respect to the different substrates

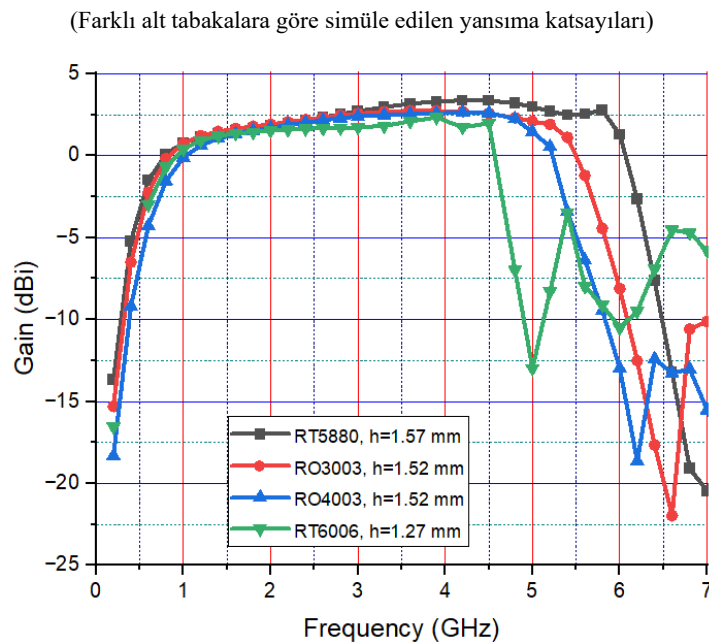


Figure 3. Simulated Antenna Gains with respect to the different substrates
(Farklı alt tabakalara göre simüle edilen anten kazançları)

Table 2 presents the comparison of properties of the dielectric substrates and the simulation results of the proposed filtenna for different dielectric substrate types. As shown in Table 2, the upper cut-off frequency of the filtenna shifts through the lower frequencies, and the simulated maximum antenna gain decreases as the dielectric permittivity increases. The simulated reflection coefficient achieves -10 dB within the bandwidths of 2.67-4.89 GHz, 2.49-4.38 GHz, and 2.42-4.11 GHz for RT5880, RO3003, and RO4003, respectively.

However, for the RT6006 substrate, the reflection coefficient of the filtenna reaches -5 dB within the bandwidth of 1.93-3.54 GHz. Furthermore, the simulated maximum antenna gain of the filtenna is measured 3.37 dBi, 2.74 dBi, 2.64 dBi and 2.33 dBi for RT5880, RO3003, RO4003, and RT6006 substrates, respectively. Figure 5 depicts the 3D radiation pattern of the proposed filtenna using the RT5880 substrate at the center frequency of 3.9 GHz.

Table 2. Comparison of the Filtenna Design Simulation Results with respect to the different substrates (Farklı alt tabakalara göre simüle edilmiş Filtenna tasarımı simülasyon sonuçlarının karşılaştırması)

Parameters	Dielectric Substrate Type			
	RT5880	RO3003	RO4003	RT6006
ϵ_r	2.20	3.0	3.55	6.15
Substrate Thickness (mm)	1.57	1.52	1.52	1.27
Center Frequency (GHz)	3.78	3.44	3.26	2.74
Bandwidth (GHz)	2.67 - 4.89	2.49 - 4.38	2.42 - 4.11	1.93 - 3.54
FBW (%)	58.9%	55.0 %	51.8%	-
Reflection Coefficient (dB)	-10	-10	-10	-5
Reflection Coefficient (dB) @ f_0	-20.05	-18.59	-15.15	-8.52
Max. Gain (dBi)	3.37	2.74	2.64	2.33

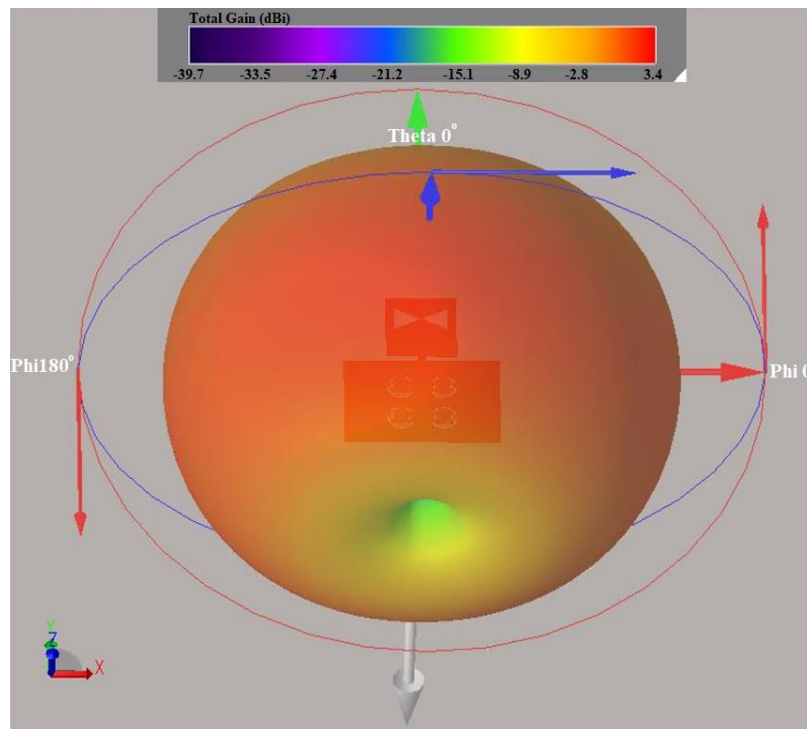


Figure 4. The 3D radiation pattern at the center frequency (3.9 GHz) (Merkez frekanstaki (3,9 GHz) 3B ışınma örüntüsü)

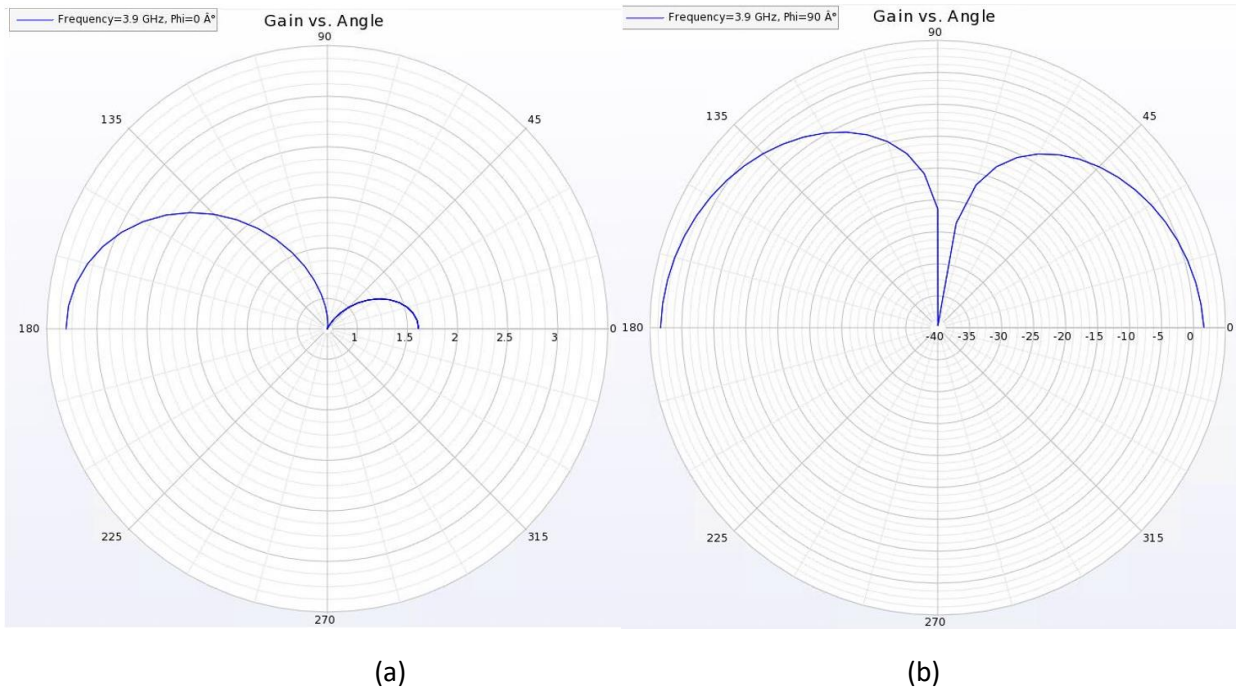


Figure 5. Far field radiation patterns when a) $\varphi=0^\circ$ b) $\varphi=90^\circ$ (Uzak alan ışıma örüntüsü a) $\varphi=0^\circ$ b) $\varphi=90^\circ$)

Figure 5 shows the far-field radiation patterns of the proposed filtenna at the center frequency of 3.9 GHz, specifically for azimuthal angles $\varphi=0^\circ$ and $\varphi=90^\circ$. The simulation results reveal that the radiation exhibits an omnidirectional characteristic, indicating a consistent radiation pattern in all directions around the filtenna.

Figure 6 illustrates the surface current distribution at the center frequency of 3.9 GHz and Figure 7 depicts the surface current distribution at the lower

cut-off frequencies of 400 MHz and upper cut-off frequencies of 7000 MHz, respectively. The results from the simulations indicate that the surface currents are predominantly concentrated along the edges of the bow-tie slot and antenna feed line within the passband. On the other hand, the current is faded on the low-pass filter of the feed line and does not flow through the patch antenna at the lower and upper cut-off frequencies.

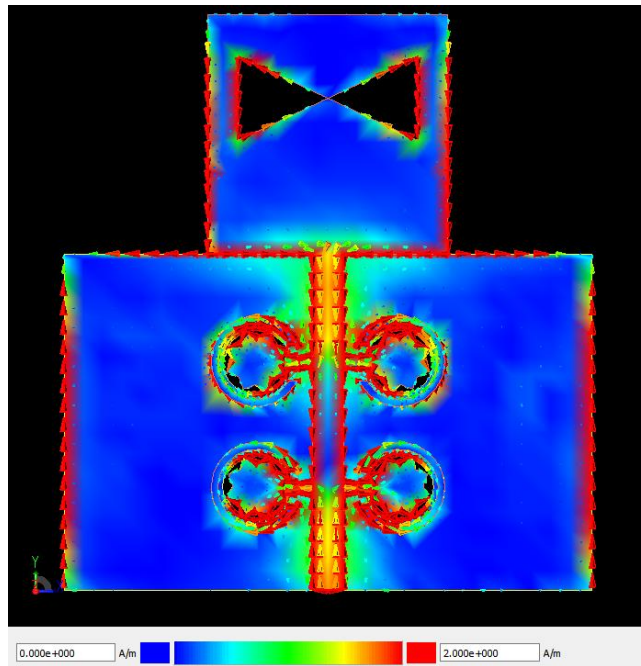


Figure 6. Current distribution at the center frequency (@3.9 GHz) (Merkez frekanstaki (3,9 GHz) akım dağılımı)

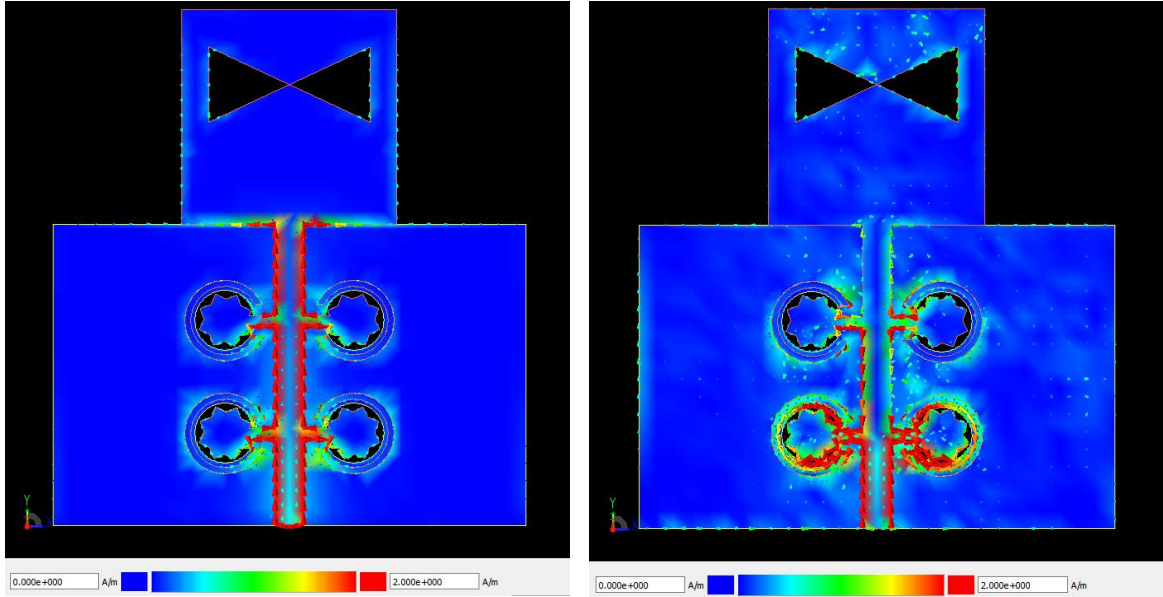


Figure 7. Current distribution at a) Lower Stop band (@400 MHz) and b) Upper Stop band (@7.0 GHz)
(a) Aşağı Bastırma bandındaki (@400 MHz) ve b) Yukarı Bastırma bandındaki (@7.0 GHz) akım dağılımı)

3.RESULTS (BULGULAR)

The proposed filtenna design was fabricated on a Rogers RT5880 dielectric substrate ($\epsilon_r=2.2$) with a thickness of 1.57 mm using an LPKF laser prototyping machine. Furthermore, a subminiature version A (SMA) connector was soldered to the antenna feed to perform the electrical tests. The S-parameter measurements were carried out using a Keysight N5222B power network analyzer in the laboratory environment at ambient temperature. Figure 8 depicts the prototyped filtenna and test setup.

Figure 9 illustrates the comparison between the simulated and measured reflection coefficients (S_{11})

of the fabricated filtenna on RT5880 substrate. It was observed that the filtenna exhibits two resonances, contributing to a smooth passband response. Consequently, the simulated FBW with $S_{11} \leq -10$ dB was calculated as 58.9% (2.67-4.89 GHz), while the measured FBW with $S_{11} \leq -10$ dB was determined as 52.4% (2.86-4.89 GHz). Furthermore, the measured FBW with $S_{11} \leq -12$ dB was calculated as 48.1% (2.94-4.8 GHz). Notably, the measured reflection coefficients of the fabricated filtenna showed good agreement with the simulation results. However, it is worth mentioning that the simulated (S_{11}) exhibited approximately an 8-dB improvement compared to the measurement result.

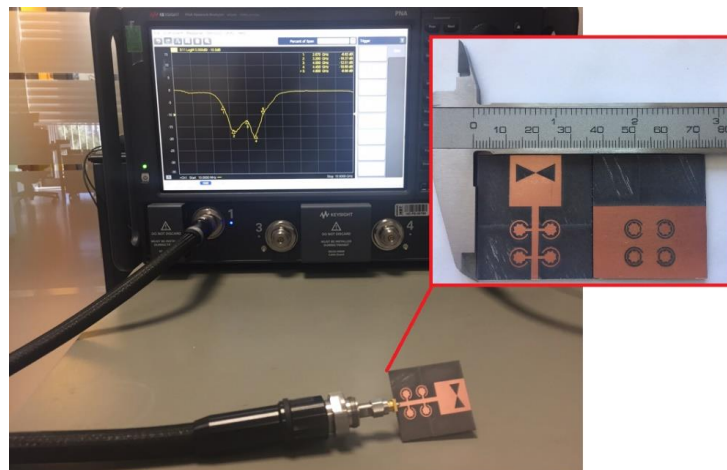


Figure 8. Test Setup (Ölçüm Düzenegi)

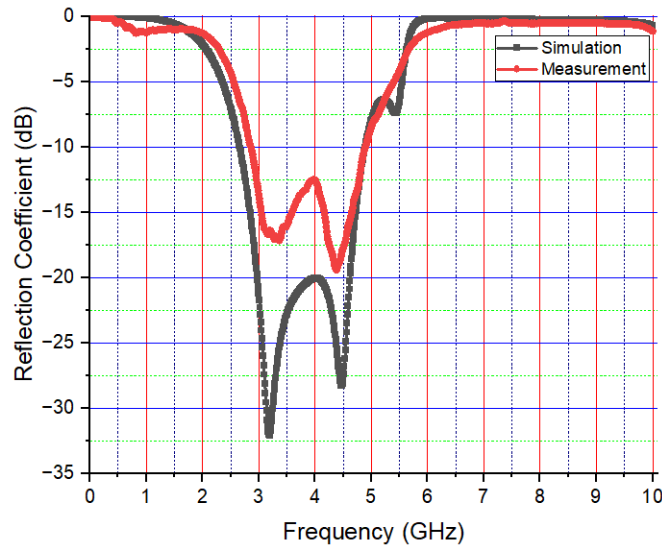


Figure 9. Simulated and Measured Reflection Coefficient (Simüle edilen ve ölçülen yansıma katsayısı)

Figure 10 illustrates the comparison between the simulated and measured antenna gain of the proposed filtenna on the RT5880 substrate. The measured and simulated antenna gains were determined as 3.26 dBi and 3.37 dBi, respectively. Furthermore, the measured harmonic suppression level exhibited better performance compared to the simulation results. However, a noticeable shift of approximately 350 MHz shift was observed between the simulation and measurement results at the lower cut-off frequency. This difference between the simulation and measurement results of the antenna gain may be attributed to factors such as the feeding with the SMA connector and the manufacturing tolerances. Additionally, it is believed that conducting the measurements in an anechoic chamber would provide more accurate and closer alignment with the simulation results in terms of the measured gain performance.

The relation between the quality factor (Q_c) of the filter can be calculated with the equation 4,

$$Q_c = \frac{f_0(VSWR-1)}{FBW\sqrt{VSWR}} \quad (4)$$

where FBW represents the fractional bandwidth and f_0 denotes the center frequency. By applying equation 4, the Q_c can be calculated as 4.96, when the maximum $VSWR$ is 1.925:1 within the operating frequency bandwidth.

Table 3 presents a comparison of the state-of-the-art filtennas found in the literature. The proposed filtenna demonstrates several advantages, including a wide FBW , excellent reflection coefficient, and a compact size.

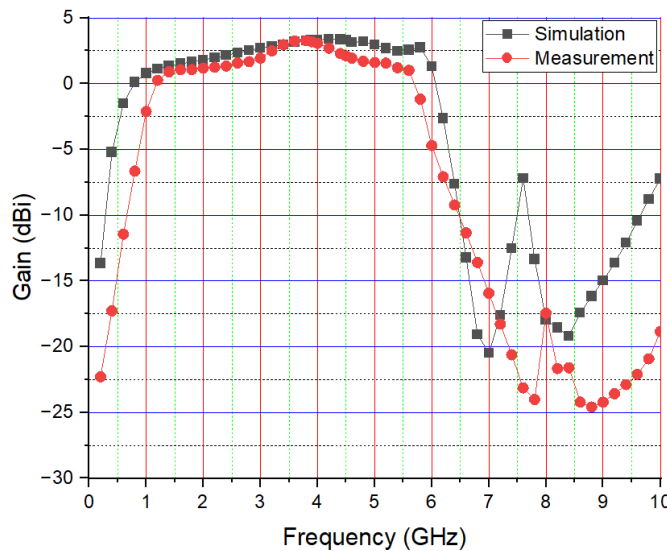


Figure 10. Simulated and Measured Antenna Gain (Simüle edilen ve ölçülen anten kazancı)

Table 3. Comparison of the state of art filtennas (Son teknoloji ürünü filtennaların karşılaştırılması)

Ref	f_0 (GHz)	FBW (%)	Size ($\lambda_0 \times \lambda_0$)	Min. $ S_{11} $ (dB)	Gain (dB)	Technology
[16]	2.6	2.6	0.31 × 0.27	13	2.2	Multilayer
[17]	3.6	15	0.92 × 0.86	14	10	Metasurface
[18]	2.5	22.8	1.70 × 1.30	20	5	Multilayer
[19]	2.45	12.2	0.65 × 0.33	28	3.5	FR4
[20]	2.4	3	0.37 × 0.36	10	2.61	FR4
[21]	1.9	19	0.35 × 0.24	12	5.6	4003C
[22]	2.45	12	0.49 × 0.49	10	5.26	FR4
[23]	2.45	10	0.49 × 0.49	10	0.65	4003C
[24]	2.4	3	0.36 × 0.39	-	2.6	FR4
[25]	2.45	6.7	0.34 × 0.18	10	1.3	F4B
[26]	2.4	19	0.38 × 0.28	10	2.3	FR4
[27]	2.45	-	0.41 × 0.41	15	1.2	4003C
[28]	2.4	7.5	0.28 × 0.24	-	0.74	FR4
This work	3.9	52.4	0.46 × 0.51	10	3.26	RT5880
	3.9	48.1	0.46 × 0.51	12	3.26	RT5880

less pits and less crater formations increased the accuracy of measurement.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study focuses on the design, simulation, and experimental validation of a bow-tie slot-loaded monopole patch antenna featuring a single feed and a four-pole low pass filter. The fabricated filtenna achieves a reflection coefficient of -10 dB within the frequency bandwidth of 2.86 to 4.89 GHz, resulting in a fractional bandwidth of 52%. The maximum realized antenna gain reaches 3.26 dBi, and the radiation pattern exhibits an omnidirectional characteristic. In addition, the filtering characteristic is achieved by incorporating split ring resonators on the antenna feed lines, and the defected ground structure is utilized to enhance the bandwidth. It is considered that the prototyped filtenna can be utilized for 5G applications with its compact size, low cost, and high-performance characteristics.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors would like to thank ASELSAN Inc. for allowing them to utilize the manufacturing and testing infrastructure.

Yazarlar ASELSAN AŞ'ye üretim ve test alt yapılarının kullanımına imkân tanıdığı için teşekkür ederler.

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)

Galip Orkun ARICAN: He conducted the design, simulations, electrical tests, analyzed the results and performed the writing process.

Tasarımı, simülasyonları, elektriksel testleri, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Mert KARAHAN: He conducted the electrical tests, analyzed the results and performed the writing process.

Elektriksel testleri 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] Guo BZ, Hu KZ, Yan D, Pan SY, Tang MC & Wang P. Design of compact dual-band substrate integrated waveguide filtenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2022;64(6):1070-1076.
- [2] Karahan M & Aksoy E. Design and analysis of angular stable antipodal F-type frequency selective surface with multi-band characteristics. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020;30(12):e22466.
- [3] Niu BJ & Tan JH. Dipole filtering antenna with quasi-elliptic peak gain response using parasitic elements. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019;61(6):1612-1616.
- [4] Dokmetas B, Arican GO, Akcam N & Yazgan, E. A novel millimeter-wave U-shaped radiating slot antenna with DGS structures for 5G cellular application. In: 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, 2019. p. 669-672.
- [5] Ibrahim AA, Mohamed HA, Rizo ARD, Parra-Michel R & Aboushady H. Tunable filtenna with DGS loaded resonators for a cognitive radio system based on an SDR transceiver. *IEEE Access*, 2022;10:32123-32131.
- [6] Habergoturen Ates S, Okan T & Akcam N. Biyomedikal uygulamaları için vücut içi geniş bantlı İD-EDDK beslemeli SBT bant anten analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2022;11(3):567-573.
- [7] Saxena S, Sharma R, Upadhyay MD, Shrivastava A & Mishra PK. Novel filtenna for wireless applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021;47:6953-6959.
- [8] Behera D, Dwivedy B, Mishra D & Behera SK. Design of a CPW fed compact bow-tie microstrip antenna with versatile frequency tunability. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018;12(6):841-849.
- [9] Wang C, Wang X, Liu H, Chen Z & Han Z. Substrate integrated waveguide filtenna with two controllable radiation nulls. *IEEE Access*, 2020;8:120019-120024.
- [10] Shome PP & Khan T. A novel filtenna design for ultra-wideband applications. In: 2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). IEEE, 2018. p. 1-4.
- [11] Zamanifekri A, Smolders AB & Bliyiannis I. Dual-frequency filtenna using defected ground structure for VSAT applications. In: 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE, 2014. p. 434-435.
- [12] Hu KZ, Tang MC, Li D, Wang Y & Li M. Design of compact, single-layered substrate integrated waveguide filtenna with parasitic patch. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019;68(2):1134-1139.
- [13] Mishra SR & Lalitha SK. Implementation of defected ground structure for microstrip filtenna design. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020;30(1):e21998.
- [14] Cuneray K, Akcam N, Okan T & Arican GO. 28/38 GHz dual-band MIMO antenna with wideband and high gain properties for 5G applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2023;162:154553.
- [15] Jin H, Nie S, Wang W, Chin KS, Peng L & Luo GQ. A broadband single-fed circularly polarized patch filtenna with high suppression level. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2022;64(8):1394-1400.
- [16] Cui J, Zhang A & Yan S. Co-design of a filtering antenna based on multilayer structure. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020;30(2):e22096.
- [17] Park J, Jeong M, Hussain N, Rhee S, Park S & Kim N. A low-profile high-gain filtering antenna for fifth generation systems based on nonuniform metasurface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019; 61(11):2513-2519.
- [18] Song L, Wu B, Xu M, Su T & Lin L. Wideband balun filtering quasi-Yagi antenna with high selectivity. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019;61(10):2336-2341.
- [19] Jadhav JB & Deore PJ. Filtering antenna with radiation and filtering functions for wireless applications. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2017;4(1):125-134.
- [20] Nasser ZAA, Zakaria Z, Shairi NA, Zabri SN & Zobilah AM. Design of compact filtenna based on capacitor loaded square ring resonator for wireless applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2020;96:21-31.
- [21] Gao Y, Jiao YC, Weng ZB, Zhang C & Zhang YX. A filtering dielectric resonator antenna with high band-edge selectivity. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2020;89:63-71.
- [22] Sabran MI, Rahim SKA, Yen LC, Rahman TA, Eteng AA & Jizat NM. Compact filtenna with defected ground structure for wireless power transfer application. In: 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2015. p.1-4.

- [23] Chuang CT, Chung SJ. Synthesis and design of a new printed filtering antenna. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2011;59(3):1036-1042.
- [24] Nasser ZAA, Zakaria Z, Shairi NA, Zabri SN, Zobilah AMS. Design of compact filtenna based on capacitor loaded square ring resonator for wireless applications. *Progr Electromagn Res.* 2020;96:21-31.
- [25] Min XL, Zhang H. Compact filtering antenna based on dumbbellshaped resonator. *Progr Electromagn Res.* 2017;69:51-57.
- [26] Chen X, Zhao F, Yan L, Zhang W. A compact filtering antenna with flat gain response within the passband. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter.* 2013;12:857-860.
- [27] Chuang CT, Chung SJ. A compact printed filtering antenna using a ground-intruded coupled line resonator. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2011;59(10):3630-3637.
- [28] Pal P, Sinha R, Mahto SK. Synthesis approach to design a compact printed monopole filtenna for 2.4 GHz Wi-Fi application. *Int J RF Microw Comput Aided Eng.* 2021;31:e22619.
- [29] Maleki A, Oskouei HD & Mohammadi Shirkolaei M. Miniaturized microstrip patch antenna with high inter-port isolation for full duplex communication system. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2021;31(9):e22760.

Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Farklı Parametrelerle Kesilmiş Liflevhanın Pürüzlülük Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin PELİT^{1*} , Özkan YAMAN² 

¹Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

²Akyazı Mesleki Eğitim Merkezi, 54400, Akyazı/SAKARYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/09/2023
Düzeltilme: 23/10/2023
Kabul: 02/11/2023

Anahtar Kelimeler

Aşındırıcı Su Jeti
Kesme Parametreleri
Liflevha
Pürüzlülük Özellikleri

Article Info

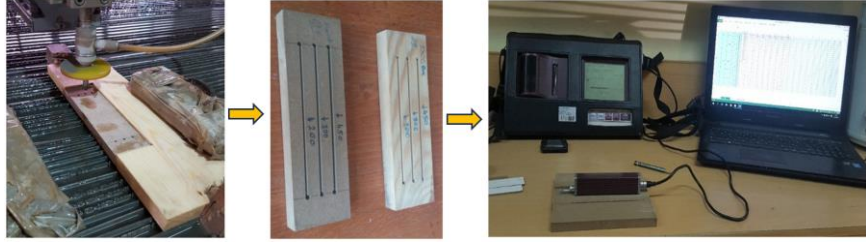
Research article
Received: 28/09/2023
Revision: 23/10/2023
Accepted: 02/11/2023

Keywords

Abrasive Water Jet
Cutting Parameters
Fiberboard
Roughness Properties

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, aşındırıcı su jeti (ASJ) sisteminde kesilmiş orta yoğunluklu liflevha (MDF) malzemenin kenar pürüzlülük özellikleri üzerine seçilmiş işleme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Örneklerde Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri analiz edilmiş ve endüstriyel uygulamalara yönelik öneriler sunulmuştur. / In this study, the effect of selected processing parameters on the edge roughness properties of medium density fiberboard (MDF) material cut in the abrasive water jet (AWJ) system was examined. Ra, Rq and Rz roughness values in the samples were analyzed and suggestions for industrial applications were presented.



Şekil A: MDF örneklerin ASJ sisteminde kesilmesi ve pürüzlülük ölçümleri / **Figure A:** Cutting of MDF samples in AWJ system and roughness measurements

Önemli noktalar (Highlights)

- MDF örneklerin kesilmesinde yüksek verimliliğe sahip, düşük maliyetli, basit, temiz ve güvenilir bir teknoloji olan ASJ makinesi kullanılmıştır. / AWJ machine, which is a high-efficiency, low-cost, simple, clean, and reliable technology, was used to cut the MDF samples.
- MDF örnekler ASJ makinesi ile farklı parametrelerde kesilmiş ve örneklerin pürüzlülük özellikleri belirlenmiştir. / MDF samples were cut with the ASJ machine at different parameters and the roughness properties of the samples were determined.
- Örneklerin kesim yüzeyi düzgünlüğünde seçilmiş işleme parametrelerinin etkisi önemli bulunmuştur. / The effect of selected processing parameters on the smoothness of the cutting surface of the samples was found to be significant.

Amaç (Aim): Bu çalışmada, levha kalınlığı, kesici sıvı basıncı, aşındırıcı akış oranı ve ilerleme hızı faktörlerinin ASJ sisteminde kesilen MDF örneklerin pürüzlülük özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to determine the effects of board thickness, cutting liquid pressure, abrasive flow rate and feed rate factors on the roughness properties of MDF samples cut in the AWJ system.

Özgünlük (Originality): Çalışmada, geleneksel veya bilgisayar kontrollü ahşap işleme makinelerine güçlü bir alternatif olarak yeni nesil ve çevre etkisi düşük aşındırıcı su jeti sistemi kullanılmıştır. / In the study, a new generation abrasive water jet system with low environmental impact was used as a powerful alternative to traditional or computer-controlled wood processing machines.

Bulgular (Results): Levha kalınlığı ve ilerleme hızı artışı ile pürüzlülük değerleri artmıştır. Ayrıca, aşındırıcı miktarı ve kesici sıvı basıncı artışına bağlı olarak pürüzlülük özellikleri genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. / Roughness values increased with increasing board thickness and feed rate. Additionally, roughness properties generally tended to decrease depending on the increase in the amount of abrasive and cutting liquid pressure.

Sonuç (Conclusion): Örneklerin pürüzlülük değerlerinde levha kalınlığı ve ASJ ilerleme hızı parametreleri birinci derecede öneme sahiptir. / Board thickness and AWJ feed rate parameters are of primary importance in the roughness values of the samples.



Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Farklı Parametrelerle Kesilmiş Liflevhanın Pürüzlülük Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin PELİT^{1*} , Özkan YAMAN² 

¹Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

²Akyazı Mesleki Eğitim Merkezi, 54400, Akyazı/SAKARYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/09/2023
Düzeltilme: 23/10/2023
Kabul: 02/11/2023

Anahtar Kelimeler

Aşındırıcı Su Jeti
Kesme Parametreleri
Liflevha
Pürüzlülük Özellikleri

Öz

Bu çalışmada, aşındırıcı su jeti (ASJ) sisteminde farklı işleme parametreleri ile kesilen orta yoğunluklu liflevha (MDF) örneklerin kenar pürüzlülük özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. 18, 36 ve 54 mm kalınlıklarında hazırlanmış olan liflevhalar, ASJ sistemi ile 50, 100 ve 200 mm/dk ilerleme hızı; 200, 300 ve 450 gr/dk aşındırıcı kütle akış oranı; 300 ve 380 MPa kesici sıvı basıncı uygulanarak kesilmiştir. Örneklerde kesim yüzeyi özellikleri R_a , R_q ve R_z pürüzlülük değerleri analiz edilerek belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, lif levha kalınlığı ve ASJ ilerleme hızı artışına bağlı olarak pürüzlülük özellikleri de artmıştır. Diğer taraftan, aşındırıcı miktarı ve kesici sıvı basıncındaki artış ile pürüzlülük değerleri genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, örneklerin pürüzlülük özelliklerinde levha kalınlığı ve ASJ ilerleme hızı parametreleri birinci derecede öneme sahipken, aşındırıcı akış oranı ve kesici sıvı basıncı parametrelerinin daha az bir öneme sahip olduğu belirlenmiştir.

Investigation of Roughness Properties of Fiberboard Cut with Different Parameters in Abrasive Water Jet System

Article Info

Research article
Received: 28/09/2023
Revision: 23/10/2023
Accepted: 02/11/2023

Keywords

Abrasive Water Jet
Cutting Parameters
Fiberboard
Roughness Properties

Abstract

In this study, it was aimed to determine the edge roughness properties of medium density fiberboard (MDF) samples cut with different processing parameters in the abrasive water jet (AWJ) system. Fiberboards with 18, 36, and 54 mm thicknesses were cut with ASJ system at feed rates of 50, 100 and 200 mm/min; abrasive mass flow rates of 200, 300 and 450 g/min; cutting liquid pressures of 300 and 380 MPa. Cutting surface properties of the samples were determined by analyzing R_a , R_q and R_z roughness values. According to the study results, roughness properties increased due to the increase in fiberboard thickness and AWJ feed rate. On the other hand, roughness values generally showed a decreasing trend with the increase in abrasive amount and cutting liquid pressure. However, it was determined that the sheet thickness and AWJ feed rate parameters were of primary importance in the roughness properties of the samples, while the abrasive flow rate and cutting liquid pressure parameters were of less importance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin işlenmesinde geleneksel makinelerin kullanımı her geçen gün azalmakta ve önemini yitirmektedir. Günümüzde, teknolojik ilerlemelere bağlı olarak geliştirilen bilgisayar kontrollü ve tam otomatik makineler, geleneksel makinelerin yerini almaktadır. Yeni nesil makineler, üretim hattının hızlanmasına, iş gücünün azalmasına ve ürün çeşitliliğine olanak sağlayarak, işletmeler açısından ürün maliyetlerini düşürmede büyük bir öneme sahiptir [1].

Mobilya, dekorasyon ve yapısal doğrama ürünlerinin imalatında farklı geometrik ve karmaşık şekiller sıklıkla tercih edilmektedir. Bu özellikteki ürünlerin hızlı ve kolay bir şekilde işlenebilmesi için bazı özel kesme yöntemlerinin uygulanması gerekir. Malzeme kesiminde dört temel işleme yöntemi belirtilmiştir. Bunlar; doğrusal ters hareket ile testere kesimi, CNC (Computer Numeric Control/Bilgisayarlı Sayısal Kontrol) frezeleme, lazer kesim ve aşındırıcı su jeti kesimidir [2]. Ahşap malzemenin önemini artırmak ve ona daha fazla değer katmak için işleme yöntemlerinin (frezeleme, kesme vb.) geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Su jeti

teknolojisi ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin işlenmesinde son yıllarda umut verici seçeneklerden biri olarak uygulanmaktadır [3].

Su jeti teknolojisi değişik özellikteki malzemelerin kesim işlemleri için kullanılabilen geleneksel olmayan yeni bir endüstriyel yöntemdir. Su jeti işleme teknolojisinin prensibi, iş parçasına mekanik olarak etki eden sıvı aracılığı ile kesim olarak açıklanabilir [4-7]. Su jeti teknolojisinde farklı kesme özelliklerine göre, saf su jeti (SJ) ile kesme ve aşındırıcı su jeti (ASJ) ile kesme şeklinde iki pratik yöntem kullanılır [5, 6]. Ancak seramik, ahşap, metal gibi daha sert malzemelerin işlenmesi sürecinde SJ yönteminin geliştirilmiş bir formu olan ASJ teknolojisi daha verimli bir kesim yöntemidir [8]. ASJ sistemi, silika kumu, garnet, alüminyum oksit, silisyum karbür gibi aşındırıcı parçacıkların, çeşitli özellikteki malzemeleri aşındırmak/kesmek için yüksek basınçlı su ile sürüklendiği mekanik bir yöntemdir [9].

ASJ veya SJ teknolojileri, havacılık ve uzay mühendisliği, askeri mühendislik, otomotiv sanayi, yapı malzemeleri ve dekorasyon elemanları, gıda işleme ve yeraltı madenciliği gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Bu teknolojiler, kumaş, kâğıt, ahşap, plastik, cam, mermer, metal gibi değişik özellikteki birçok malzemenin kesiminde kullanılabilen önemli avantajlara sahip bir kesme sistemi olmuştur [11]. Çok basit, temiz ve güvenilir bir teknolojidir ve bu nedenle diğer kesme yöntemlerine alternatif olur [12,13]. Ayrıca su jeti teknolojisi, ahşap ve ahşap esaslı paneller ile ince kereste parçalarının kesilmesi ve yüksek hassasiyetli kakmacılık elemanları gibi zor şekilli parçaların seri üretimi için uygundur [14]. Ahşabın işlenmesinde su jeti teknolojisinin kullanılması yeterli kesim kalitesi, yüksek verimlilik, düşük maliyet, çevre koruma ve basit çalışma sistemi gibi önemli avantajlara

sahiptir [15-17]. Geleneksel ahşap işleme makinelerindeki toz maruziyeti [18] ve yüksek gürültü gibi problemler için su jeti ile kesme etkili bir çözüm sunar [14]. Ayrıca, sentetik reçineler ve doğal liflerle üretilen kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında, plastik matrisin erimesi ve daha sonra da kesici takımlara yapışması sorunu ortaya çıkar. Bu sorun, su jeti teknolojisinin kullanılmasıyla çözülebilir [19].

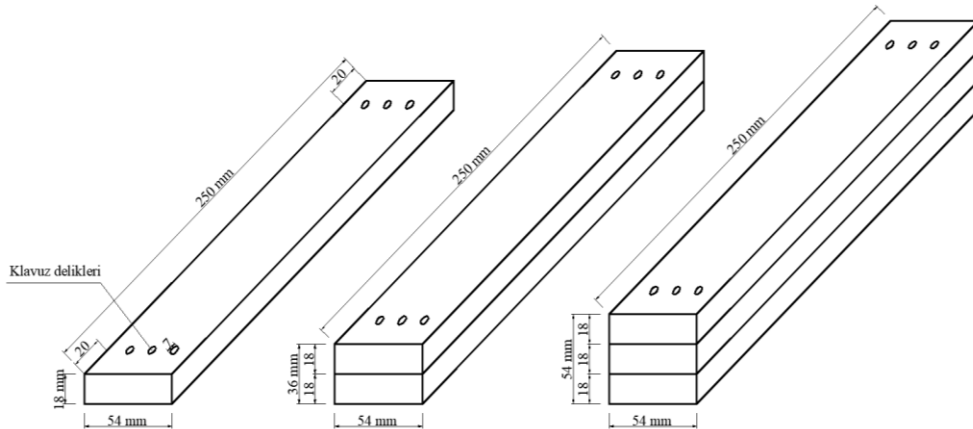
Ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin yüzey kalitesi nihai ürünlerin maliyetleri ve estetik özellikleri açısından önemli bir kriterdir. Yüzey pürüzlülüğü, ahşap ürünlerin yüzey kalitesini belirlemek için kullanılan temel bir faktördür [20, 21]. İşlenmiş ahşap ürünlerin yüzey pürüzlülüğü yapıştırma ve üstyüzey işlemleri gibi daha sonraki süreçleri önemli derecede etkiler [22-26].

Bu çalışmada, orta yoğunluklu liflevha örnekler ASJ sisteminde farklı işleme parametreleri uygulanarak kesilmiştir. Levha kalınlığı, kesici sıvı basıncı, aşındırıcı akış oranı ve ilerleme hızı gibi seçilmiş faktörlerin liflevha örneklerde R_a , R_q ve R_z pürüzlülük değerleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Böylece, örneklerde daha düzgün kesim yüzeyleri elde edebilmek için ASJ sisteminde en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Liflevha Örneklerin Hazırlanması (Preparation of Fiberboard Samples)

Çalışmada, mobilya endüstrisi ve dekorasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan orta yoğunluklu liflevha (MDF) tercih edilmiştir. Kastamonu Entegre firmasına ait olan 18 mm kalınlıkta ve birinci sınıf kalitedeki liflevha deney materyali olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. Farklı kalınlıkta hazırlanmış liflevha örneklerin ölçüleri (Dimensions of fiberboard samples prepared in different thicknesses)

Panel halindeki levhadan 550×200 mm taslak ölçülerinde yeterli sayıda numune kesilmiş ve daha sonra numuneler D3 normuna sahip polivinilasetat (PVAc) tutkalı kullanılarak iki ve üç kat olacak şekilde üst üste yapıştırılarak lamine edilmiştir. Laminasyon sonrası örnekler 20±2 °C sıcaklık ve %65±3 bağıl nem şartlarında değişmez kütleye ulaşana kadar bekletilmiştir. Ardından örnekler, 250×54 mm ölçülerinde ve üç farklı kalınlıkta (18 mm, 36 mm ve 54 mm) olacak şekilde hazırlanmıştır. Aşındırıcı su jeti (ASJ) sistemiyle kesim esnasında liflevha örneklerin sabit kalmasını sağlamak için örneklerin boy yönündeki

kenarlarından 20 mm içeride ve çapı 7 mm olan kılavuz delikler açılmıştır (Şekil 1).

2.2. ASJ Sisteminde Örneklerin Kesimi (Cutting of Samples in ASJ System)

Liflevha örneklerin farklı parametrelerdeki kesim işlemlerinde bilgisayar kontrollü konsol tip ASJ makinesi (model: su jeti S-HP) kullanılmıştır. ASJ ile kesme süreçleri *CT Kesme Teknolojileri ve Makina San. Tic.Ltd. Şti.*'nde gerçekleştirilmiştir. Kesim sürecinde uygulanan parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. ASJ kesiminde uygulanan parametreler (Parameters applied in AWJ cutting)

Parametre	Değer
Levha kalınlığı (mm)	18, 36, 54
ASJ ilerleme hızı (mm/dk.)	50, 100, 200
Aşındırıcı kütle akış oranı (g/dk.)	200, 300, 450
Kesici sıvı (su) basıncı (MPa)	300, 380
ASJ nozul (meme) çapı (mm)	0.76
ASJ meme uzunluğu (mm)	80

Kesme işlemleri sırasında örneklerdeki titreşimi ve hareketi önlemek için, kesilecek liflevhalar önceden hazırlanan kalıplar arasına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Kesim işlemleri, daha önce açılan kılavuz deliklerden başlamış ve bitirilmiştir (Şekil

2). Kesim süreçlerinde, ASJ nozul ucu kesilecek örneğin yüzeyinden 3 mm yukarıda olacak şekilde ayarlanmıştır. ASJ sisteminde, 7,5-8 Mohs sertliği arasındaki garnet/granat aşındırıcı olarak kullanılmıştır.

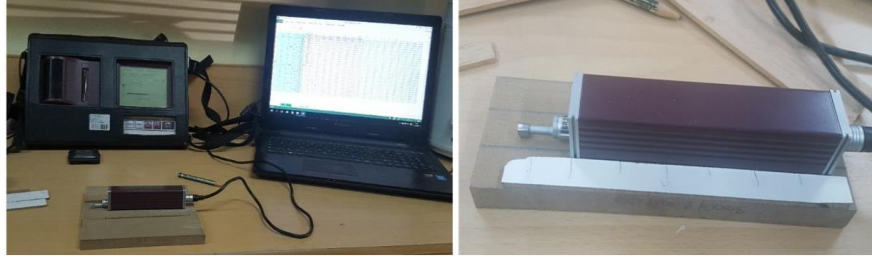


Şekil 2. Örneklerin ASJ sisteminde kesilmesi (Cutting of samples in the AWJ system)

Kesme işlemlerinden sonra liflevha örneklerin uç kısımlarındaki fazlalıklar kılavuz delikler hizasından daire testere makinesinde kesilmiştir. Daha sonra örnekler 20±2 °C sıcaklık ve %65±3 bağıl nem şartlarında sabit bir ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiş ve yüzey pürüzlülük testi için hazır hale getirilmiştir.

2.3. Pürüzlülüğün Belirlenmesi (Determination of Roughness)

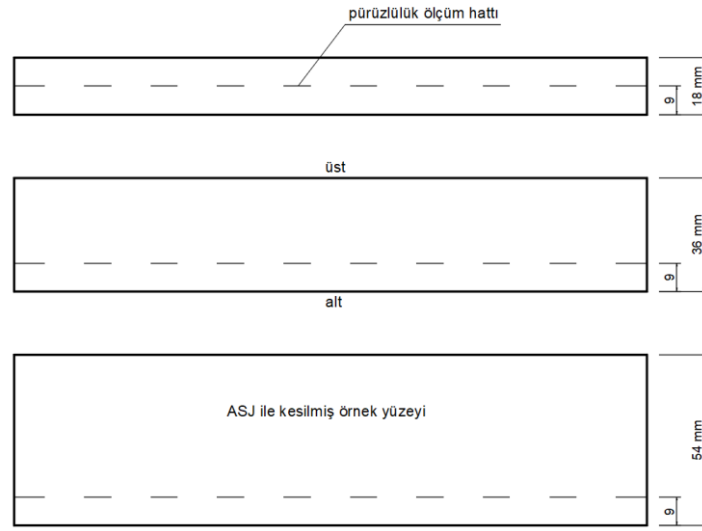
Liflevha örneklerin pürüzlülük ölçümleri, dokunmalı (iğneli) ve ardışık profil değişikliklerini ölçebilen "Mitutoyo SurfTest SJ-301" marka/model cihaz ile TS EN ISO 21920-2 [27] esasları çerçevesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Örneklerin pürüzlülük özelliklerinin belirlenmesinde; ortalama pürüzlülük değeri (R_a), ortalama pürüzlülük sapmalarının karekökü (R_q) ve on nokta pürüzlülük ortalama değeri (R_z) parametreleri esas alınmıştır.



Şekil 3. Pürüzlülük cihazı ve ölçümü (Roughness device and measurement)

Pürüzlülük ölçümleri için cihaz, 2,5 mm ölçme adımı uzunluğu, 5 ölçme sayısı ve 15 mm/dk ölçme hızına ayarlandıktan sonra, kesilen yüzeylerin belirli bir hat üzerindeki sekiz farklı noktasından ($n=8$) yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Liflevha örneklerde farklı kalınlıklara göre

ölçümlerin yapıldığı hat Şekil 4'te gösterilmiştir. Liflevha örneklerden toplamda 432 adet (3 levha kalınlığı \times 3 ilerleme hızı \times 3 aşındırıcı akış oranı \times 2 kesici sıvı basıncı \times 8 ölçüm tekrarı) ölçüm alınmıştır.



Şekil 4. Liflevha kalınlıklarına göre kenar pürüzlülük ölçüm hattı (Edge roughness measurement line according to fiberboard thickness)

2.4. İstatistiksel Analiz Belirlenmesi (Statistical Analysis)

İstatistiksel değerlendirmeler için MSTAT-C yazılımı kullanılmıştır. ASJ ile kesilmiş liflevha örneklerin kenar pürüzlülük özellikleri üzerine seçilen işleme parametrelerinin etkisini belirlemek için 0,05 önem düzeyinde varyans analizleri yapılmıştır. Değişkenler arasındaki önemli farklılıklar Duncan testleri ile karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

ASJ sisteminde farklı işleme parametreleri ile kesilen liflevha örneklerin pürüzlülük özelliklerine ilişkin varyans analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre, örneklerin Ra , Rq ve Rz pürüzlülük değerleri üzerinde levha kalınlığı, ilerleme hızı, aşındırıcı kütle akış oranı ve kesici sıvı basıncı faktörlerinin etkisi önemli bulunmuştur ($p \leq 0,05$).

ASJ ile farklı işleme parametrelerinde kesilen liflevha örneklerin Ra , Rq ve Rz ortalama değerlerinin karşılaştırılması için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Levha kalınlığına ilişkin; en düşük Ra , Rq ve Rz değeri ortalamaları 18 mm kalınlıktaki örneklerde, en yüksek ise 54 mm kalınlıktaki örneklerde elde edilmiştir. ASJ sistemi ile kesilen liflevha örneklerde kalınlık artışına bağlı olarak pürüzlülük değerleri artış göstermiştir (Şekil 5). 18 mm kalınlık ile karşılaştırıldığında, 54 mm kalınlıkta hazırlanan örneklerde Ra , Rq ve Rz ortalama değerleri sırası ile %20,4, %20,2 ve %24,8 artmıştır. Pürüzlülük özelliklerindeki bu artışlar, su jeti nozul ucundan çıkan ultra yüksek basınçlı sıvı (su) ve aşındırıcı partiküllerin, nozul uç kısmından uzaklaştıkça geniş bir açı oluşturması ve daha düzensiz bir yayılım göstermesinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca ilk aşamada malzemenin yüzeyine çarpan yüksek basınçlı suyun malzemede alt kısımlara ulaştıkça ilk şiddetini kaybetmiş olması da sonuçlar üzerine etki

edebilir. Önceki çalışmalarda, basınçlı su hüzmesinin malzemeye girdiği noktadan sonra derinlik arttıkça sapma açısında arttığı, böylece kesilen malzeme kalınlığı artışıyla kesilen yüzeyde meydana pürüzlülüğün çizgisel izlere veya dalgalı

bir oluşuma dönüştüğü ifade edilmiştir. Ayrıca, ASJ kesimi süreci içinde aşındırıcı partiküllerin keskinliğindeki ve sıvı basıncındaki azalmaların daha pürüzlü bir yüzeye neden olduğu belirtilmiştir [28, 29].

Table 2. *Ra*, *Rq* ve *Rz* pürüzlülük değerleri için varyans analizi sonuçları (Analysis of variance results for *Ra*, *Rq* and *Rz* roughness values)

Faktör	Pürüzlülük parametresi					
	<i>Ra</i>		<i>Rq</i>		<i>Rz</i>	
	F değeri	$p \leq 0,05$	F değeri	$p \leq 0,05$	F değeri	$p \leq 0,05$
Levha kalınlığı	208,2756	0,0000*	212,2751	0,0000*	222,4981	0,0000*
İlerleme hızı	313,3745	0,0000*	323,5352	0,0000*	335,8104	0,0000*
Aşındırıcı akış oranı	7,7449	0,0005*	10,1327	0,0001*	15,5114	0,0000*
Kesici sıvı basıncı	33,1891	0,0000*	35,6318	0,0000*	36,3131	0,0000*

*: %95 güven düzeyinde önemli

Table 3. Uygulanan faktörlere ilişkin liflevha örneklerin *Ra*, *Rq* ve *Rz* ortalama pürüzlülük değerleri için Duncan testi karşılaştırmaları (Duncan test comparisons for the average roughness values *Ra*, *Rq* and *Rz* of fiberboard samples regarding the applied factors)

Faktör	Pürüzlülük parametresi					
	<i>Ra</i>		<i>Rq</i>		<i>Rz</i>	
	OD (μm)	HG	OD (μm)	HG	OD (μm)	HG
Levha kalınlığı (mm)						
18	8,93	c	11,06	c	39,25	c
36	9,43	b	11,64	b	42,36	b
54	10,75	a	13,29	a	48,98	a
İlerleme hızı (mm/dk)						
50	8,85	c	10,97	c	51,64	c
100	9,25	b	11,40	b	53,25	b
200	11,02	a	13,63	a	63,63	a
Aşındırıcı akış oranı (g/dk)						
200	9,90	a	12,28	a	57,56	a
300	9,67	b	11,94	b	56,20	b
450	9,55	b	11,78	b	54,76	c
Kesici sıvı basıncı (MPa)						
300	9,92	a	12,27	a	57,41	a
380	9,49	b	11,73	b	54,94	b

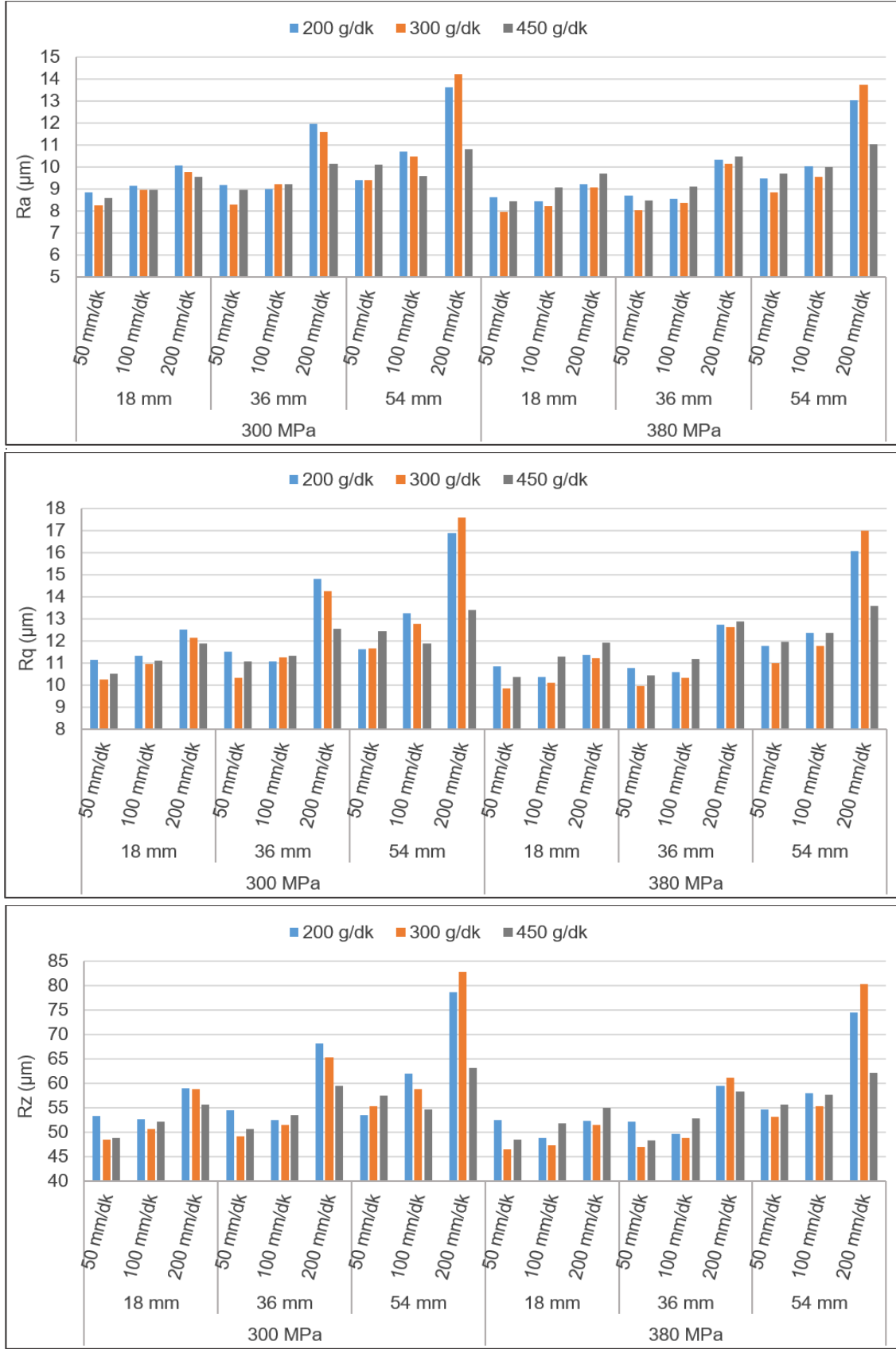
OD: Ortalama değer, HG: Homojenlik gurubu

ASJ sisteminde ilerleme hızına ilişkin, en yüksek *Ra*, *Rq* ve *Rz* değeri ortalaması 200 mm/dk ilerleme hızı ile, en düşük ise 50 mm/dk ilerleme hızı ile elde edilmiştir (Tablo 3). Liflevha örneklerde ölçülen tüm pürüzlülük özellikleri ASJ sistemi ilerleme hızı artışına bağlı olarak genellikle artmıştır (Şekil 5). 50 mm/dk ilerleme hızı ile karşılaştırıldığında, 200 mm/dk ilerleme hızı ile kesilen örneklerde *Ra*, *Rq* ve *Rz* ortalama değerleri sırası ile %24,5, %24,2 ve %23,2 artmıştır. ASJ sisteminde ilerleme hızı artışı ile birim alana temas eden kesici sıvı ve aşındırıcı miktarının azalması böylece de kesim işlemlerinin

zorlaşmasının sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Su jeti sisteminde ilerleme hızı, bir malzemenin kesme/aşındırma etkisine maruz bırakıldığı süre şeklinde tanımlanmaktadır. İlerleme hızındaki azalma, kesilen malzemede bir alanın daha uzun süreyle su jeti etkisi altında kalması demektir. Böylece kesilmiş yüzeyde birim alana etki eden aşındırıcı partikül miktarı artar ve bu duruma bağlı olarak yüzey kalitesi iyileşir [28, 29]. ASJ veya SJ (sade su jeti) sisteminde kesilen ağaç malzemelerin yüzey kalitesinin incelendiği çalışmalarda, ilerleme hızı artırıldığında yüzey

pürüzlülük değerlerinin de arttığı ifade edilmiştir [1, 14]. Ayrıca, ASJ sisteminde kesilmiş farklı özellikteki malzemeler için gerçekleştirilen

çalışmalarda da ilerleme hızı arttıkça pürüzlülük değerlerindeki artışı rapor edilmiştir [8, 30-32].



Şekil 5. ASJ ile farklı parametrelerde kesilmiş liflevha (MDF) örneklerin Ra, Rq ve Rz değerleri (Ra, Rq and Rz values of fiberboard (MDF) samples cut with AWJ at different parameters)

Aşındırıcı akış oranı düzeyinde, en yüksek Ra , Rq ve Rz değeri ortalaması 200 g/dk aşındırıcı miktarında, en düşük ise 300 ve 450 g/dk aşındırıcı miktarında belirlenmiştir (Tablo 3). Kesici sıvı (su) içerisine eklenen aşındırıcı miktarındaki artış ile örneklerin pürüzlülük değerlerinin genel olarak azaldığı görülmüştür. Bu durum, yüksek ilerleme hızı (200 mm/dk) ile kesilen ve 54 mm kalınlıkta hazırlanmış liflevha örneklerinde daha belirgindir (Şekil 5). 200 g/dk'ya göre, 450 g/dk aşındırıcı akış oranıyla kesilmiş örneklerde Ra , Rq ve Rz ortalama değerleri sırası ile %3,5, %4,1 ve %4,9 azalmıştır. Aşındırıcı miktarındaki artış nedeniyle, kesme esnasında kesici su etkisinin azalarak aşındırıcı partikül etkisi artışının sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Literatürde, ASJ kesim sisteminde aşındırıcı miktarı artışının birim yüzeye etki edecek aşındırıcı taneciklerin artması anlamı taşıdığı, böylece kesilmiş yüzeydeki pürüzlülükte veya dalgalı oluşumda bir azalmanın beklenebileceği ifade edilmiştir [29]. Diğer taraftan, ASJ ile kesilmiş liflevha (MDF) örneklerin pürüzlülük değerleri üzerine aşındırıcı akış miktarı, ilerleme hızı ve levha kalınlığı parametreleri etkisinin önemsiz bulunduğu belirtilmiştir [5].

ASJ sisteminde kesici sıvı basıncına ilişkin; Ra , Rq ve Rz değeri ortalamaları 300 MPa ile karşılaştırıldığında 380 MPa basınçta daha düşük belirlenmiştir (Tablo 3). Liflevha örneklerin pürüzlülük değerleri, kesici sıvı basıncı artışına bağlı olarak azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 5). 300 MPa basınç ile karşılaştırıldığında, 380 MPa basınçta kesilen örneklerde Ra , Rq ve Rz ortalama değerleri sırası ile %4,3, %4,4 ve %4,3 azalmıştır. Önceki bir çalışmada, ASJ ile kesilen bambu malzemede sıvı basıncı artışı ile pürüzlülüğün bir miktar azaldığı ifade edilmiştir [6]. Ayrıca, ASJ ile kesilmiş geniş yapraklı üç ağaç türünün (okan, iroko, merbau) yüzey kalitesi üzerinde sıvı basıncının en önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [3]. Diğer taraftan, ASJ sisteminde kesilen farklı ağaç malzemelerin (sarıçam, Doğu kayını, sapsız meşe) pürüzlülük özellikleri üzerine kesici sıvı basıncı etkisinin ağaç türüne göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [1]. Kesici sıvı basıncının malzemede yüzey pürüzlülüğünden çok, yüzeyde oluşan dalgalılık veya çiziklik üzerine daha etkili olduğu ifade edilmiş ve sıvı basıncı artışı ile yüzeyde dalgalı oluşumun arttığı ancak yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişimin olmadığı ifade edilmiştir [29, 33].

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ASJ sisteminde kesilmiş liflevha (MDF) örneklerin kenar pürüzlülük özellikleri

üzerine seçilmiş işleme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Liflevha örneklerin Ra , Rq ve Rz pürüzlülük değerleri levha kalınlığı ve ASJ sistemi ilerleme hızı artışına bağlı olarak artış göstermiştir. 18 mm kalınlığa göre, 54 mm kalınlığında hazırlanan örneklerde pürüzlülük özellikleri %25'e kadar artmıştır. 50 mm/dk ilerleme hızı ile kesilen örnekler göre, 200 mm/dk ilerleme hızı ile kesilen örneklerin pürüzlülük özelliklerinde ise %24'e kadar artış yaşanmıştır. Diğer taraftan, aşındırıcı akış oranı ve kesici sıvı basıncındaki artış sonucu yüzey pürüzlülük değerleri genel olarak azalma eğilimi göstermiş ve örneklerin kenar düzgünlüğü iyileşmiştir. 200 g/dk'ya göre, 450 g/dk aşındırıcı akış oranında kesilmiş örneklerde pürüzlülük özellikleri %5'e kadar azalmıştır. Ayrıca, 300 MPa'ya göre, 380 MPa kesici sıvı basıncında kesilen örneklerin pürüzlülük özelliklerinde %4'e kadar bir azalma olmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, liflevha örneklerin pürüzlülük değerleri üzerinde levha kalınlığı ile ASJ ilerleme hızının önemli bir etkiye sahip olduğu ancak aşındırıcı akış oranı ve kesici sıvı basıncı etkisinin daha az bir öneme sahip olduğu görülmüştür. ASJ sisteminde kesici sıvı basıncının çok yüksek olması nedeniyle iç kesim işlemi yapılan liflevha örneklerde katmanlar-lifler arası kopmalar veya yarılmalar oluşmaktadır. Bu sorunu önlemek ve verimliliği arttırmak için, kesme işlemine ilk başlanacak alana önceden kılavuz bir delik açılması önerilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Düzce Üniversitesi BAP-2017.07.01.521 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. / This study was supported by Düzce University Scientific Research Project numbered BAP-2017.07.01.521.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hüseyin PELİT: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

Özkan YAMAN: Deneysel örneklerini hazırlamış ve deneyleri yapmıştır.

He prepared the experimental samples and conducted the experiments.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pelit H., Yaman Ö., Influence of processing parameters on the surface roughness of solid wood cut by abrasive water jet, *BioResources*, 15 (2020), 6135-6148.
- [2] Kminiak R., Gaff M., Fabrication of structural joinery items of solid wood by the mean of abrasive water jet method, *Wood Research*, 59 (2014), 499-507.
- [3] Wang Z., An investigation on water jet machining for hardwood floors, *European Journal of Wood and Wood Products*, 70 (2012), 55-59.
- [4] Barčík Š., Kvietková M., Aláč P., Effect of the chosen parameters on deflection angle between cutting sides during the cutting of agglomerated materials by water jet, *Wood Research*, 56 (2011), 577-588.
- [5] Kvietkova M., Barčík Š., Bomba J., Aláč P., Impact of chosen parameters on surface undulation during the cutting of agglomerated materials with an abrasive water jet, *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty*, 57 (2014), 111-123.
- [6] Li R., Ekevad M., Guo X., Cao P., Wang J., Chen Q., Xue H., Pressure, feed rate, and abrasive mass flow rate influence on surface roughness for recombinant bamboo abrasive water jet cutting, *BioResources*, 10 (2015), 1998-2008.
- [7] Oh T.M., Cho G.C., Characterization of effective parameters in abrasive water jet rock cutting, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47 (2014), 745-756.
- [8] Saraçyakupoğlu T. (2012). Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [9] Sreekesh K., Govindan P., A review on abrasive water jet cutting, *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering*, 3 (2014), 153-158.
- [10] Li M., Cao Y., Wang Z., Wang Y., Optimization and analysis of processing parameters of wooden crafts based on ultra-high pressure water jet method, *Wood Research*, 63 (2018), 117-126.
- [11] Akkurt A., Waterjet cutting systems and assessment of their industrial applications, *Journal of Polytechnic*, 7 (2004), 129-139.
- [12] Barčík Š., Kvietková M., Kminiak R., Aláč P., Optimization of cutting process of medium density fibreboards by the abrasive water-jet, *Drvna Industrija*, 62 (2011), 263-268.
- [13] Kvietková M., Topography of material made by the application of abrasive water jet technology, *Journal of Forest Science*, 60 (2014), 318-323.
- [14] Gerencsér K., Bejó L., Investigations into the water jet cutting of solid wood, *Wood Research*, 52 (2007), 57-64.
- [15] Ábrahám J., Bak M., Németh R., The effect of high pressure water jet on the surface quality of wood, *Pro Ligno*, 11 (2015), 471-477.
- [16] Hou R., Huang C., Zhu H., Numerical simulation ultrahigh waterjet (WJ) flow field with the high-frequency velocity vibration at the nozzle inlet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (2014), 1087-1092.
- [17] Li M., Xie W., Wang C.X., Cao Y., Wang Z., Parameters optimization for ultrahigh-pressure pure water and abrasive water jet of *Pterocarpus macarocarpus* Kurz processing, *Wood Research*, 63 (2018), 783-794.
- [18] Çınar H., Yıldırım K., Okurcan E., Mobilya Üreten İşletmelerde Ahşap ve Kompozit Panel Tozlarının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri . Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8 (2020), 909-921.
- [19] Hutyrová Z., Ščučka J., Hloch S., Hlaváček, P., Zeleňák M., Turning of wood plastic composites by water jet and abrasive water jet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84 (2016), 1615-1623.
- [20] Kılıç M., Effects of machining methods on the surface roughness values of *Pinus nigra* Arnold wood, *BioResources*, 10 (2015), 5554-5562.
- [21] Pinkowski G., Szymański W., Krauss A., Stefanowski S., Effect of sharpness angle and feeding speed on the surface roughness during milling of various wood species, *BioResources*, 13 (2018), 6952-6962.
- [22] Richter K., Feist W.C., Knaebe T.K., The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance, *Forest Products Journal*, 45 (1995), 91-97.

- [23] Hizirođlu S., Zhong Z.W., Ong W.K., Evaluating of bonding strength of pine, oak and nyatoh wood species related to their surface roughness, *Measurement*, 49 (2014), 397-400.
- [24] Söđütlü C., Nzokou P., Koc I., Tutgun R., Döngel N., The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials, *Journal of Coatings Technology and Research*, 13 (2016), 863-870.
- [25] Salca E.A., Krystofiak T., Lis B., Evaluation of selected properties of alder wood as functions of sanding and coating, *Coatings*, 7 (2017), 1-10.
- [26] Söđütlü C., Determination of the effect of surface roughness on the bonding strength of wooden materials, *BioResources*, 12 (2017), 1417-1429.
- [27] TS EN ISO 21920-2 (2022). Geometrik ürün özellikleri (GPS) - Yüzey yapısı: Profil - Bölüm 2: Terimler, tanımlar ve yüzey yapısı parametreleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [28] Ohlsson L. (1995). The Theory and Practice of Abrasive Water Jet Cutting, Ph.D. Dissertation, Division of Materials Processing, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [29] Karakurt İ., Aydın G., Aydın K., Effect of cutting parameters on the surface roughness of granite in abrasive waterjet cutting, *Journal of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 31 (2010), 99-110.
- [30] Akkurt A., Kulekci M.K., Seker U., Ercan F., Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 147 (2004), 389-396.
- [31] Hascalik A., Çaydaş U., Gürün H., Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy, *Materials & Design*, 28 (2007), 1953-1957.
- [32] Aydın G., Karakurt I., Aydın K., An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive water jet, *Bulletin of Materials Science*, 34 (2011), 985-992.
- [33] Shipway P.H., Fowler G., Pashby I.R., Characteristics of the surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets, *Wear*, 258 (2005), 123-132.



Examination of the Relationship between the Location of Wind Plants and the Earthquake Risk: Case Study Türkiye

Anıl Özdemir¹ , Murat Pınarlık^{1*} 

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

Article Info

Research article
Received: 17/07/2023
Revision: 02/10/2023
Accepted: 11/10/2023

Keywords

Earthquake
Structural Damage
Wind Turbine Failure
Wind Turbine Locations
Wind Power Plants

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/07/2023
Düzeltilme: 02/10/2023
Kabul: 11/10/2023

Anahtar Kelimeler

Deprem
Yapısal Hasar
Rüzgar Türbini Göçmesi
Rüzgar Türbini Konumları
Rüzgar Enerjisi Santralleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In order to evaluate the earthquake risk of WPPs, they were classified according to the earthquake hazard map published by AFAD and their proximity to active faults was determined. / RES'lerin deprem riskini değerlendirmek amacıyla AFAD tarafından yayınlanan deprem tehlike haritasına göre sınıflandırılmış ve aktif faylara yakınlıkları tespit edilmiştir.

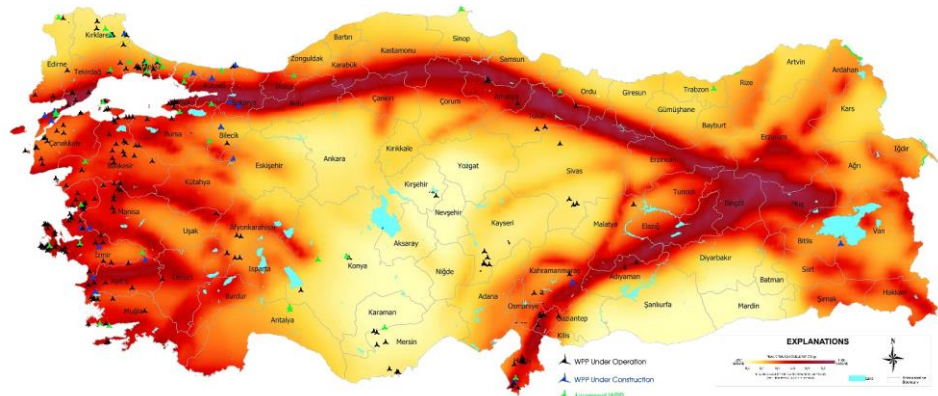


Figure A: Positions of licensed, unlicensed, and still under-construction WPPs according to the earthquake risk map / **Şekil A:** Lisanslı, lisanssız ve inşaatı devam eden RES'lerin deprem risk haritasına göre konumları

Highlights (Önemli noktalar)

- Statistics on accidents occurring in wind turbine power plants have been created. / Rüzgar türbini santrallerinde meydana gelen kazalara ilişkin istatistikler oluşturulmuştur.
- The proximity of the wind power plants in Türkiye to the fault has been determined. Statistical data on the proximity to the fault are presented. / Türkiye'deki rüzgar santrallerinin faya yakınlığı tespit edilmiştir. Faya yakınlığa ilişkin istatistiksel veriler sunulmaktadır.
- By comparing the wind potential with the earthquake risk map, location suggestions were made for the wind turbine plants planned in the future. / Rüzgar potansiyeli deprem risk haritası ile karşılaştırılarak gelecekte yapılması planlanan rüzgar türbini santralleri için yer önerilerinde bulunulmuştur.

Aim (Amaç): This study focuses on providing a comprehensive analysis of the causes of wind turbine damage, offering statistical insights into this subject. / Bu çalışma, rüzgar türbini hasarlarının nedenlerine ilişkin kapsamlı bir analiz sağlamaya ve bu konuda istatistiksel bilgiler sunmaya odaklanmaktadır.

Originality (Özgünlük): The study discusses the various factors influencing the selection of suitable locations for wind turbine power plants, while also exploring relevant international laws and regulations. / Çalışmada rüzgar türbini santralleri için uygun yer seçimini etkileyen çeşitli faktörler tartışılırken, ilgili uluslararası yasa ve düzenlemeler de inceleniyor.

Results (Bulgular): When the map showing the proximity of WPPs to active faults was examined, it was determined that only 27% of WPPs were located 25 km or more away from active faults. / RES'lerin aktif faylara yakınlığını gösteren harita incelendiğinde, RES'lerin yalnızca %27'sinin aktif faylara 25 km ve daha uzakta yer aldığı tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): New locations characterized by low earthquake risk and high wind efficiency are proposed for future wind power plant projects. / Gelecekteki rüzgar santrali projeleri için deprem riski düşük, rüzgar verimliliği yüksek yeni lokasyonlar önerilmektedir.



Examination of the Relationship between the Location of Wind Plants and the Earthquake Risk: Case Study Türkiye

Anıl Özdemir¹ , Murat Pınarlık^{1*}

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

Article Info

Research article
Received: 17/07/2023
Revision: 02/10/2023
Accepted: 11/10/2023

Keywords

Earthquake
Structural Damage
Wind Turbine Failure
Wind Turbine Locations
Wind Power Plants

Abstract

The significance of renewable energy resources has become increasingly prominent in light of the global population growth and the inadequacy of existing energy sources. Among these resources, wind energy stands out as a highly efficient option for sustainable power generation worldwide. Türkiye has emerged as an attractive hub in this field with its capacity to accommodate both onshore and offshore wind turbines. Given Türkiye's favourable geographical location, wind energy holds great potential in the country. Consequently, there has been a steady rise in the number of wind power plants established for electricity generation in Türkiye, along with an increase in their installed power capacity. However, the regions hosting these wind power plants face dynamic challenges, such as the risk of earthquakes, which can jeopardize their continuous operation. This study focuses on providing a comprehensive analysis of the causes of wind turbine damage, offering statistical insights into this subject. Additionally, the study discusses the various factors influencing the selection of suitable locations for wind turbine power plants, while also exploring relevant international laws and regulations. An initial step involves creating a map illustrating the existing wind turbine plant locations to initiate the research. The study also presents statistical data regarding the distribution of wind turbine plants in earthquake-prone regions, subsequently, by considering the earthquake map established in Türkiye's 2018 earthquake regulation, an assessment of earthquake risks is conducted based on the existing wind turbine power plant locations. As a result, new locations characterized by low earthquake risk and high wind efficiency are proposed for future wind power plant projects.

Rüzgar Türbinlerinin Konumu ile Deprem Risk Bölgeleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi: Türkiye Örneği

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/07/2023
Düzeltilme: 02/10/2023
Kabul: 11/10/2023

Anahtar Kelimeler

Deprem
Yapısal Hasar
Rüzgar Türbini Göçmesi
Rüzgar Türbini Konumları
Rüzgar Enerjisi
Santralleri

Öz

Küresel nüfus artışı ve mevcut enerji kaynaklarının yetersizliği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi, dünya çapında sürdürülebilir enerji üretimi için oldukça verimli bir seçenek olarak ön plana çıkıyor. Türkiye, hem karadaki hem de denizdeki rüzgar türbinlerini barındırma kapasitesiyle bu alanda cazip bir merkez olarak ortaya çıkmıştır. Türkiye'nin elverişli coğrafi konumu göz önüne alındığında, rüzgar enerjisi ülkede büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'de elektrik üretimi amacıyla kurulan rüzgâr santrallerinin sayısında ve kurulu güç kapasitesinde istikrarlı bir artış yaşanmaktadır. Ancak bu rüzgar santrallerine ev sahipliği yapan bölgeler, deprem riski gibi dinamik zorluklarla karşı karşıyadır ve bu durum santrallerin sürekli çalışmasını tehlikeye atabilmektedir. Bu çalışma, rüzgar türbinlerinde meydana gelen hasarların nedenlerine ilişkin kapsamlı bir analiz sağlamaya ve bu konuya ilişkin istatistiksel bilgiler sunmaya odaklanmaktadır. Ek olarak, çalışma rüzgar türbini enerji santralleri için uygun yerlerin seçimini etkileyen çeşitli faktörleri tartışırken, aynı zamanda ilgili uluslararası yasa ve düzenlemeleri de incelemektedir. Çalışma kapsamında mevcut rüzgar türbini tesisi konumlarını gösteren bir harita oluşturulmuştur. Ardından rüzgar türbini santrallerinin depreme duyarlı bölgelerdeki dağılımına ilişkin istatistiksel veriler sunulmuştur. 2018 yılında yayımlanan deprem yönetmeliğindeki deprem tehlike haritası dikkate alınarak mevcut rüzgar türbini santral lokasyonları için deprem risk değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak, gelecekteki rüzgar santrali projeleri için düşük deprem riski ve yüksek rüzgar verimliliği ile karakterize edilen yeni lokasyonlar önerilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Today, it is known that the traditional methods and fossil fuel types used for energy production have adverse effects on the environment, human health, and natural resources. Therefore, there is an intense focus on renewable energy sources around the world. The leading renewable energy sources are solar, wind, geothermal, hydraulic, biomass, wave, and hydrogen energies. The most important of these groups is wind energy [1,2]. This is because wind is a renewable energy source that produces no greenhouse gases or emissions during power generation. The “fuel” required for production is free and theoretically inexhaustible. As technology advances, the cost of adding new capacity gradually decreases. Wind energy is one of the most widely used renewable, environmental energy sources in the world. The theoretical potential of wind energy power in Türkiye is estimated to be approximately 118,000 MW. The total potential of the turbine

installable land areas is 48,000 MW [3]. Electricity generation from wind energy began in 1998, and Türkiye has continued to increase yearly [4]. With 843 MW commissioned in 2022, the total wind installed power reached 11,945 MW. The development of wind energy installed power in Türkiye is shared in Figure 1. Electricity generation from wind power in Scotland exceeded electricity consumption in November 2018. At the end of 2018, the share of electricity generated from wind energy in worldwide electricity use increased from 3.1% to 4.8% compared to 2015 [6]. This is an indication that investments in wind energy continue rapidly in the world. In 2020, the share of Denmark, Uruguay, Lithuania, Ireland, Portugal, England, Germany, Spain, Greece, Sweden, the USA, and China in electricity generation capacity from wind energy is respectively 56%, 40%, 36%, 35%, 23%, 24, 23%, 20%, 18%, 16%, 8%, and 6%. Besides, Türkiye has an installed capacity of 10.81% electricity generation from wind energy in 2022 [7].

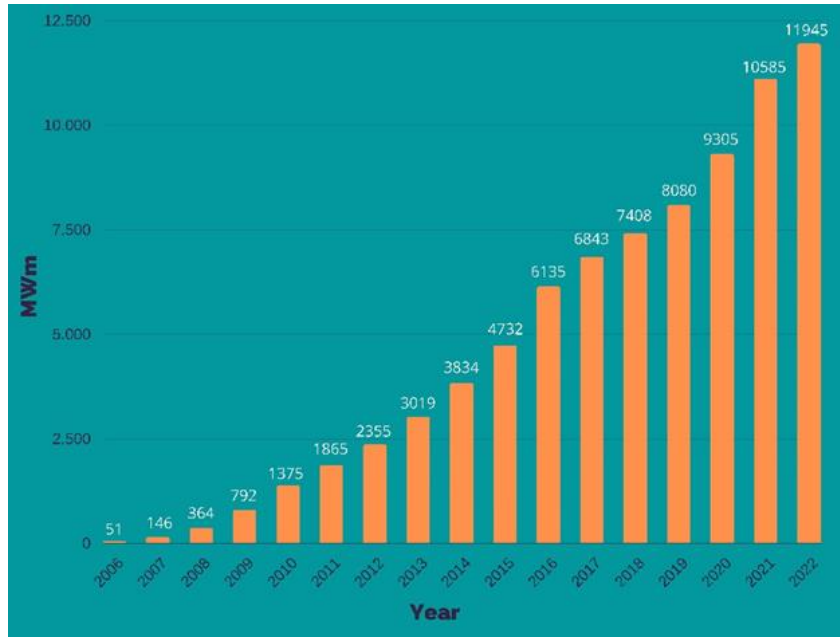


Figure 1. Cumulative wind power installed capacity of Türkiye (Türkiye'nin kümülatif rüzgar enerjisi kurulu gücü) [5]

To use wind energy efficiently, first of all, the correct determination of the wind energy potential and, accordingly, the correct positioning of the wind turbines are of great importance. For an economic investment in a wind power plant, it must have a capacity value of 35% or more. Referring to Figure 2 on the map of Türkiye in wind capacity factor for wind energy, especially in the regions located on the

sea coast of the country is seen as a serious potential. The same situation is observed in some parts of the country (Central Anatolia, Black Sea, Aegean, and Mediterranean regions). In addition, annual average wind power density distribution and annual average wind speed distribution maps should be examined for the efficiency of this investment.

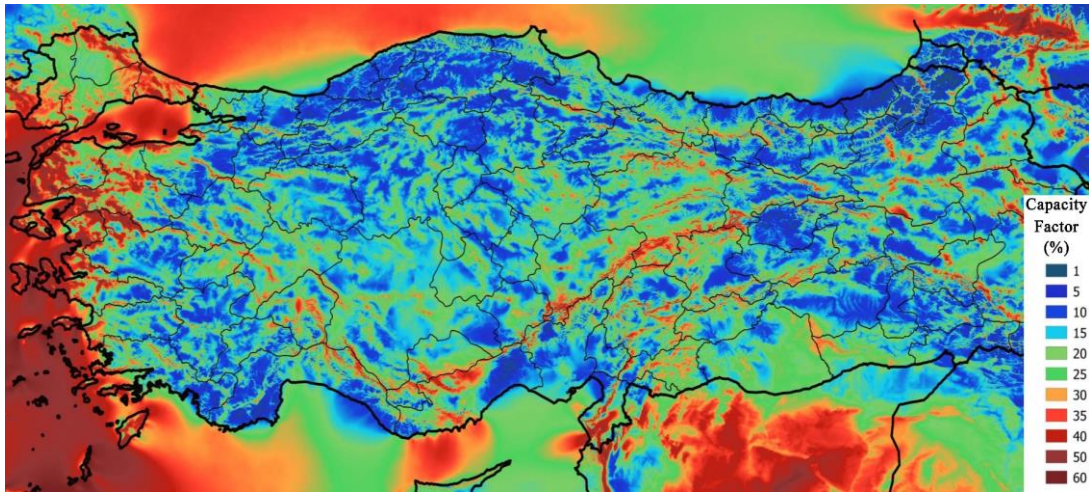


Figure 2. Average capacity factor distribution at an altitude of 100 meters across Türkiye (Türkiye genelinde 100 metre rakımda ortalama kapasite faktörü dağılımı) [8]

In regions where wind power plants are constructed in a continuous manner, such as areas prone to earthquakes, the dynamic effects of these earthquakes become a significant concern. This research initially involved the development of a map indicating the locations of current wind patterns. Furthermore, statistical data regarding the distribution of wind turbine power plants in relation to earthquake-prone regions were analysed. Subsequently, taking into account the earthquake map outlined in the 2018 edition of the new earthquake regulation, an evaluation of earthquake risks was conducted based on the existing locations of wind turbine power plants (WPP). The research also proposed potential future sites for wind power plants that exhibit low earthquake risks and high wind efficiency. In the literature, wind turbine design generally does not consider earthquake loads. This study determined that the risk of earthquakes in our country is high, especially in regions with high wind potential. For this reason, using earthquake load and wind load in the dynamic loads used in the design will yield positive results in both innovation and sustainability. The study also guides in determining new wind turbine locations.

2. EARTHQUAKE RISK PROFILE IN TÜRKİYE (TÜRKİYE'DE DEPREM RİSK YÖNETİMİ)

Wind turbines consist of three basic structures. These are the foundation, the carrier tower, and the rotary mechanism placed on the tower. Although these turbines are seen as different from other structures, their behaviour against dynamic loads is

examined using various methods, as in the designs of other structures. Seismic loads in wind turbine systems developed in Western and Northern European countries, most of which are not seismic zones, are handled and taken into account quite simply when compared to wind. There are two major factors behind this. Firstly, since wind turbines are very delicate structures, their cross-sections are relatively small for their size. The axial pressure caused by the tower structure and the weight of the rotor-nacelle/blades at the tower tip, as well as the bending due to wind loads, are also carried by these cross-sections. In addition to these effects, the effect of earthquake vibrations on the structure can make the structure even more fragile. Secondly, since the wind loads, which means horizontal loads like the earthquake, are more dominant than the earthquake loads (the horizontal loads they create on the turbine tower are larger), it is assumed that the turbines exposed to the severe wind loads predicted in the calculations will also withstand earthquake effects that create smaller forces than them. Although Turkey is an efficient country in terms of wind energy, it may not be a reliable country in terms of earthquakes since it is located in earthquake zones [9]. Modern wind turbines consisting of a tower 70 m and higher have not encountered the high-ground vibrations caused by a devastating earthquake. Even if there is earthquake damage, these are not given in the literature. In recent years, many devastating earthquakes have occurred in Türkiye that have caused loss of life and property. These; 1992

Erzincan, 1995 Dinar, 1998 Adana-Ceyhan, 17 August 1999 Marmara, 12 November 1999 Düzce, 2002 Afyon, 2003 Bingöl, and 2023 Kahramanmaraş earthquakes. Many existing structures were damaged in the earthquakes. After these earthquakes, the application of various performance-based analysis methods gained importance, and the use of non-linear analysis, static, and dynamic analysis methods became widespread [10].

The tectonically active areas in the western part of Türkiye are associated with high tension areas, such as the North Anatolian Fault and the Aegean extensional zone. Numerous devastating earthquakes have been recorded in West and East Anatolia. Some of the biggest earthquakes recorded in the 20th Century and 21th Early Century: Tekirdağ (1912) Ms=7.3, Erzincan (1939) Ms=7.9, Tokat (1942) Ms=7.0, Muğla (1957) Mw=7.1, Van (1976) Ms=7.5, Kocaeli (1999) Mw=7.4, Düzce (1999) Mw=7.2, and Van (2011) Ms=7.2. Finally, earthquakes with a magnitude of Mw=7.7 and Mw=7.6 occurred in Pazarcık and Ekinözü-Kahramanmaraş, which were recorded as February 6 earthquakes in Türkiye [11]. Approximately 38.000 aftershocks of these earthquakes have occurred to date [12]. The most damaging earthquakes were observed along the strike-slip North Anatolian Fault Zone. The North Anatolian Fault Zone consists of 3 branches. Of these, the northern arm passes through the Sea of Marmara,

the Middle Arm passes through Bursa, reaching the Aegean Sea, and the southern arm passes south of Bursa. Tectonic activities are active throughout western Anatolia [13]. Due to these tectonic activities, it is of great importance that calculations and construction activities are carried out without ignoring the earthquake risk of all structures, including wind turbine towers to be built in Türkiye.

3. STRUCTURAL DISRUPTIONS IN WPPS (RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALLERİNDEKİ YAPISAL BOZUKLUKLAR)

The primary loads taken into account when designing wind turbine towers are the weight of the structural components themselves and the force exerted by the wind. As a secondary factor, the tower tip mass is taken into account in dynamic and static calculations. Especially in towers with longer bladespan, the weight of the blade and rotor nacelle structure also gains an important place in these calculations. It is crucial for a wind turbine tower to possess adequate moment capacity in order to withstand the maximum wind force anticipated. Additionally, the tower should be designed with sufficient rigidity to withstand varying wind loads at different wind speeds [14]. Designing and constructing wind turbines involves high engineering work. However, despite this, human or mechanical errors and engineering errors combined with defects of the constituent elements and materials still result in hundreds of cases of structural collapse each year [15].

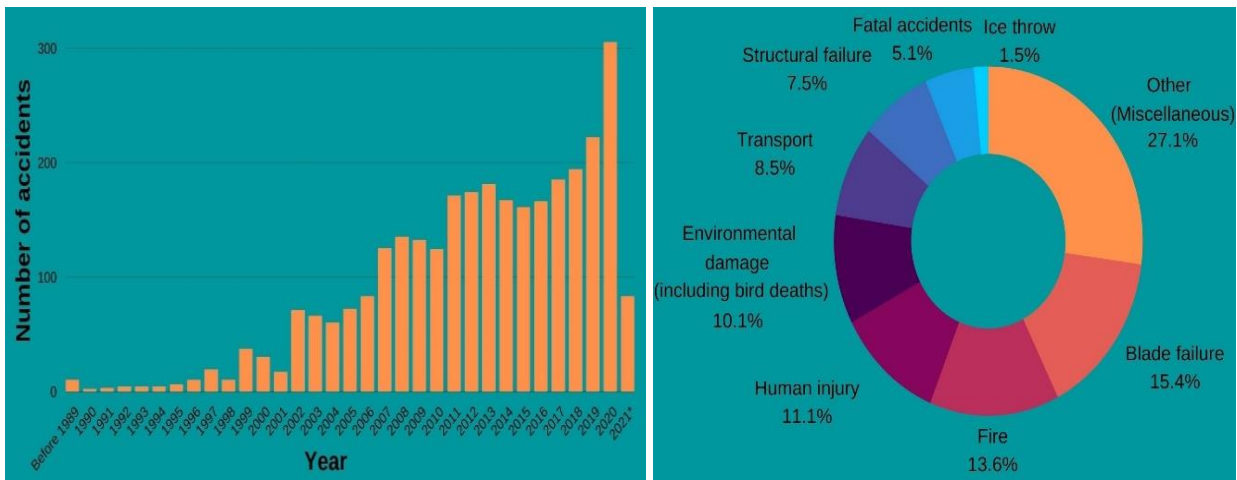


Figure 3 (a) Number of accidents in WPP between 1980 and 2021 **(b)** Failure type distribution of wind turbine incidents recorded between 2006 and 31 March 2021*(a) 1980 ve 2021 yılları arasındaki rüzgar enerji santralleri kaza sayıları b) 2006 ile 2021 yılları arasında kaydedilen rüzgar türbini olaylarının arıza türü dağılımı* [16]

Figure 3(a) presents the number of accidents in WPP between 1996 and 2021*. Figure 3(b) shows that the highest number of cases, 17.9% of the total, is caused by blade failure, followed by fire with 14.5%. Structural failure, including tower collapse and turbine damage, was the fourth-largest type of damage on the list, accounting for 9.2% of total damage. The Caithness Windfarm Information Forum 2021 report caught out that there have been 3033 wind turbine accidents in the last four years

and up to 31 March 2021. Table 1 presents the number of accidents in wind power plants in detail according to the years and the reason for their occurrence.

The general collapse patterns of wind turbine components resemble a time-varying bathtub curve. The Bathtub curve includes three typical stages: Early use, normal operation, and wear out, as shown in Figure 4.

Table 1. Distribution in the number of accidents in Global Wind Power Plants according to the year and reasons of occurrence (Küresel Rüzgar Enerji Santrallerinde meydana gelen kaza sayılarının yıllara ve meydana gelme nedenlerine göre dağılımı) [16]

Accident Types	Years													
	Before 2008	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	*21
Fatal accidents	61	8	8	15	17	5	3	8	6	9	3	5	6	2
Human injury	66	9	14	12	15	9	9	9	10	13	4	48	118	2
Blade failure	160	26	20	20	29	36	32	22	21	18	27	24	29	4
Fire	134	18	16	22	23	26	19	20	28	25	27	23	22	9
Structural failure	85	16	9	13	10	15	13	12	11	14	9	7	10	2
Ice throw	27	4	1	1	1	0	1	1	3	1	2	3	1	0
Transport	50	11	11	24	17	14	17	14	16	19	14	18	23	10
Environmental damage (including bird deaths)	55	13	20	20	20	16	21	18	22	16	24	25	24	12
Other (Miscellaneous)	130	27	25	44	42	60	52	57	49	70	84	69	72	42
Number of accidents	768	132	124	171	174	181	167	161	166	185	194	222	305	83

The infant mortality curve represents failures resulting from design errors, poor adjustments, and manufacturing errors. These failures tend to happen early in the lifetime of a system or component and are often resolved through improvements or modifications, making them less likely to reoccur. On the other hand, the wear-out curve illustrates failures caused by the deterioration of components over time. These failures become more frequent as

the system or component ages and experiences normal wear and tear. The constant failure rate curve, also known as random failures, is characterized by failures that occur evenly throughout the lifetime of the system or component. These failures seem to follow a Poisson process with a constant failure rate. Random failures are unpredictable, as components can transition directly from a healthy state to a failed state without any

warning. Preventive maintenance is typically employed for deteriorating components, where there is an intermediate damaged state between the healthy and failed states. Implementing preventive maintenance can be beneficial in these cases, as it helps to address potential issues before they lead to failure. However, it is crucial to balance maintenance efforts, as excessive preventive maintenance can result in increased costs without significant benefits. Increasing maintenance efforts can reduce failure costs but may also increase preventive maintenance costs. The optimal level of maintenance is the one that minimizes the total costs associated with failures and preventive maintenance [17]. It is important to find the right balance to achieve cost-effectiveness in maintenance strategies.

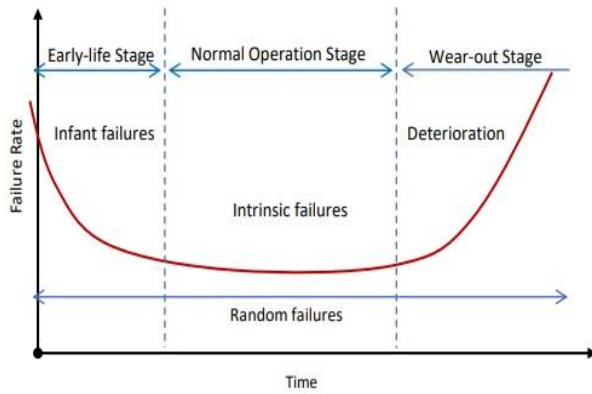


Figure 4. A Bathtub Curve for Failure Rate-Time
(Zamanla meydana gelebilecek göçme olasılığı için bathtub eğrisi)

Structurally, bolted connections are required to fasten the shell constituent components to provide sufficient rigidity in the turbine tower. Its known cyclic bending moments induced by changing wind loads and earthquakes that cause oscillation/vibration on the tower affect the rigidity of the connections, causing the flange plates to separate and the bolts to loosen. The fracture phenomenon in the material due to repeated application of the loads that create the stress values below the maximum static stress value is called fatigue failure. The effect of cyclic loading on a turbine tower can cause fatigue damage to structural members and their fasteners. The fatigue failures end in bolt loosening, which reduces the interlocking force between the joint. Then shear happens, causing the bolt to be subjected to bending

loads, immediately afterwards to fracture by fatigue. Typhoon Jangmi, which occurred in Taiwan in 2008, caused buckling and bolt ruptures in wind turbine towers [18]. In another example, the wind turbine called number 43 at the Cin Zuoyun wind turbine can be examined. While this turbine was under normal weather conditions due to insufficient maintenance of the bolts and flanges connecting its lower and middle components, it broke from this region and caused the collapse. In addition, in the same report, it was stated that although turbine tower number 63 is standing, approximately 40% of the bolts connecting the components in the tower were broken [19]. Bäckstrand and Hurtig examined the tower collapse incident in Lemnhult, Sweden, in 2015. Subsequent investigation revealed that the collapse was caused by bolt fatigue, which may have resulted from inadequate pre-tensioning force applied during the construction phase [20]. Similarly, bolt failure was seen in accidents in the USA in 2004, Denmark in 2008, and Germany in 2014. During the design process of a wind turbine tower, it is crucial to assess the fatigue performance of its components, particularly the bolts. Evaluating the stress ranges in the bolts and conducting calculations to ensure their adequacy is necessary, which helps to ensure the structural integrity and reliability of the tower under operational conditions. For this purpose, studies on structural health monitoring have been developed to improve tower damage detection strategies [21,22]. In 2012, Bas et al. created a database covering two years of their studies. Through this database, it was possible to evaluate the relationship between risk factors, including stresses on the tower, nacelle rotation, rotation speed, wind speed, angle of inclination, and temperature [23].

The factors that cause damage in Table 1 have great importance in the material loss in wind turbines. The financial impact of a complete tower collapse can range from an average of £500,000 to £5,000,000, depending on the specific configuration of the wind turbine, but construction cost would be around ten percent of the total enterprise. On the other hand, electrical components, blades, and nacelles can be fixed in the event of failure, and all blade energy harvesting to go on. Therefore, the structural safety of the turbine tower interacts with the stability of the end-to-end structure directly;

however, there are differences in its relationship with other devices such as mechanical or electrical components [24]. The increasing global adoption of wind energy suggests that more wind turbines will be constructed in regions prone to seismic activity, which poses a potential risk as entire arrays of wind turbines with similar designs could be simultaneously affected during an extreme seismic event [25,26]. In addition, a sudden transition to the Wear-out stage without seeing the Early-life and Normal operation stages specified in Figure 4 with seismic effects or passing these stages quickly creates great risk. Therefore, it is essential to understand the behaviour of these structures and their constituent parts under realistic assessments of seismic loading [27-28].

4. CURRENT WIND TURBINE LOCATIONS AND EARTHQUAKE RELATIONSHIP IN TÜRKİYE (TÜRKİYE'DEKİ GÜNCEL RÜZGAR TÜRBİNİ KONUMLARI VE DEPREM İLİŞKİSİ)

As of January 2022, 3,983 turbines have been built in 273 power plants in many parts of the country, and a total installed power of 11,102 MW has been reached. The distribution of wind power plants in terms of installed power is in Marmara Region, with

41.72% at most. The installed power ratios of other regions are respectively 33.49% Aegean Region, 10.30% Mediterranean Region, 9.36% Central Anatolia Region, 3.55% Black Sea Region, 0.84% South East Anatolia Region, and finally 0.74% East Anatolia Region. When the distribution by provinces is examined, the highest installation power is found in İzmir, with 16.99% and 1887 MW power. İzmir is followed by Balıkesir with 12.39% (1375 MW), Çanakkale with 8.26% (917.00 MW), Manisa with 6.55% (728 MW), and İstanbul with 6.16% (684 MW). WPPs still under construction are located in the Marmara region, with a rate of 86.04%; and in the Central Anatolia Region, with a rate of 8.52%. When the distribution by provinces is analysed, İstanbul ranks first with 22.56% and 181 MW of power. After İstanbul, Bursa (19.33%) is ranked second with an installed power of 155 MW, Sakarya (14.28%) with an installed power of 115 MW is the third, and Kayseri (8.52%) is the fourth with an installed power of 68 MW [29]. When the wind map of Türkiye is examined, it is seen that the windiest locations are in the Aegean and Marmara Regions, followed by the Mediterranean and the Black Sea coastlines.

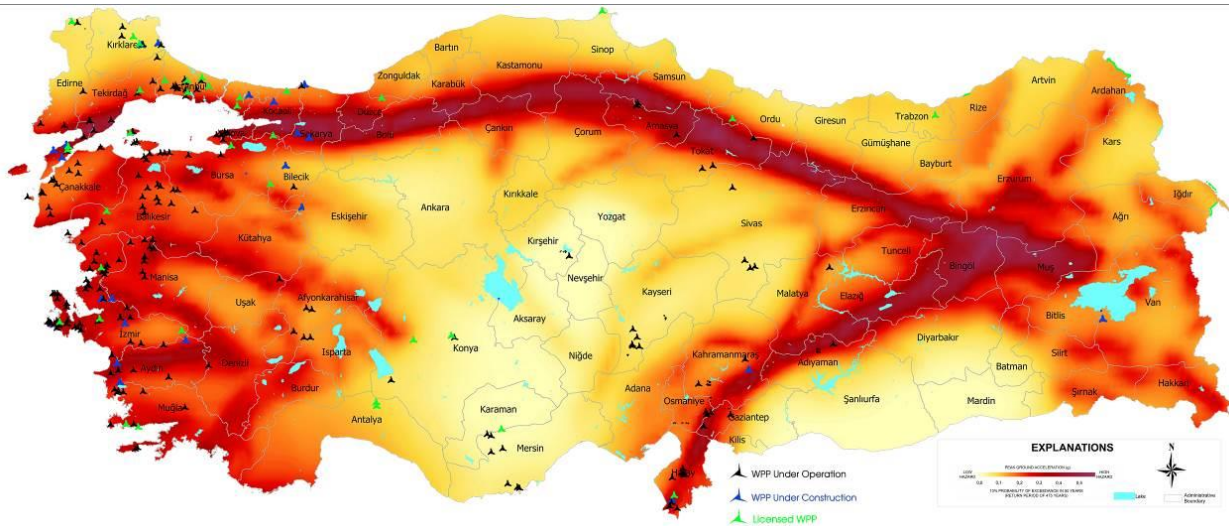


Figure 5. Positions of licensed, unlicensed, and still under-construction WPPs according to the earthquake risk map (Lisanslı, lisanssız ve inşaatı devam eden RES'lerin deprem risk haritasına göre konumları)

The scope of this study involved analysing the current status of Wind Power Plants (WPP) in Türkiye. To identify the locations of these plants, the Turkish Wind Energy Association (TWEA) released a report in January 2020. In order to assess

the earthquake hazards associated with these WPP locations, seismic data from the Turkish Building Seismic Code (TBDY-2018) were utilized. Subsequently, using the information provided by AFAD (Disaster and Emergency Management

Authority) and Turkish Atlas, the identified WPP locations were marked on a map, indicating the earthquake hazard levels associated with each site [29]. The fault map and earthquake hazard map used in this study were prepared using the maps published after the February 6 Kahramanmaraş earthquakes. Figure 5 shows the locations of Licensed, Unlicensed, and still under-construction WPPs according to the earthquake risk map. The

earthquake risk map of Turkey, published by AFAD in 2018, was created based on the Peak Ground Acceleration (PGA) values. PGA is generally used in the analysis of the effect of earthquakes and earthquake hazard analysis. Figure 6 is created using the active fault map published by AFAD to evaluate the proximity of the mentioned WPPs to active faults.

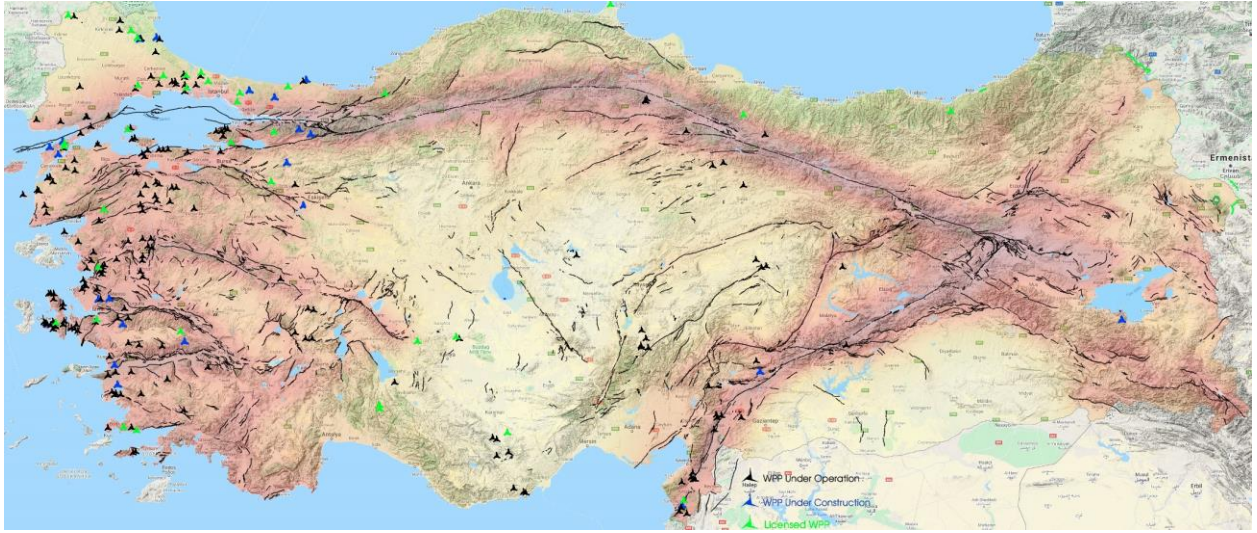


Figure 6. The proximity of licensed, unlicensed, and currently under-construction WPPs to active living faults (Lisanslı, lisanssız ve inşaatı devam eden RES'lerin aktif faylarına yakınlığı)

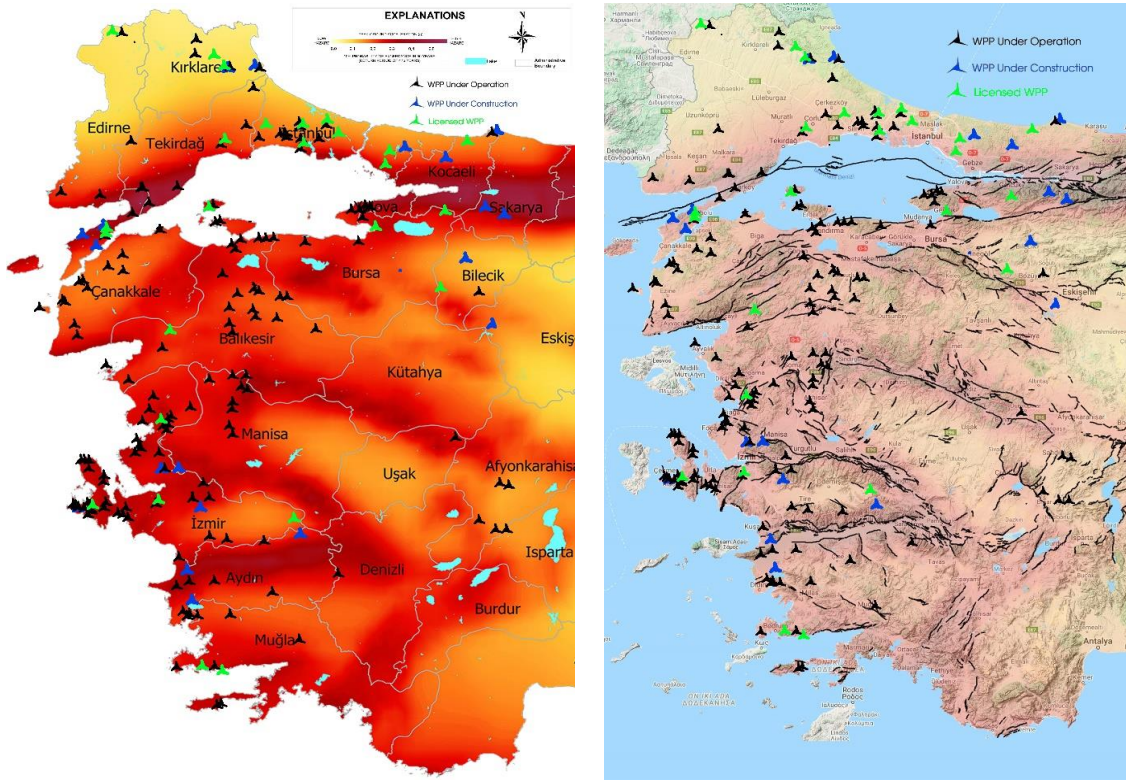


Figure 7. Status of WPPs in the Aegean and Marmara Regions (Ege ve Marmara Bölgesinde bulunan RES'lerin lokasyonları)

It has been determined that 73.17% of the total installed power of 8056 MW is located in the Aegean and Marmara regions. For this reason, Figure 7 is created to make a detailed examination covering these two regions. The examination of the locations of installed wind turbines and earthquake risk maps for the Aegean and Marmara regions reveals the current situation. However, due to wind

energy potential in these regions, wind turbine installations are rapidly continuing. Therefore, wind energy capacity factor distribution maps and earthquake risk maps are compared for these two regions in Figures 8 and 9. It is believed that this comparison will establish a roadmap when considering earthquake risks for future wind turbine installations in these regions.

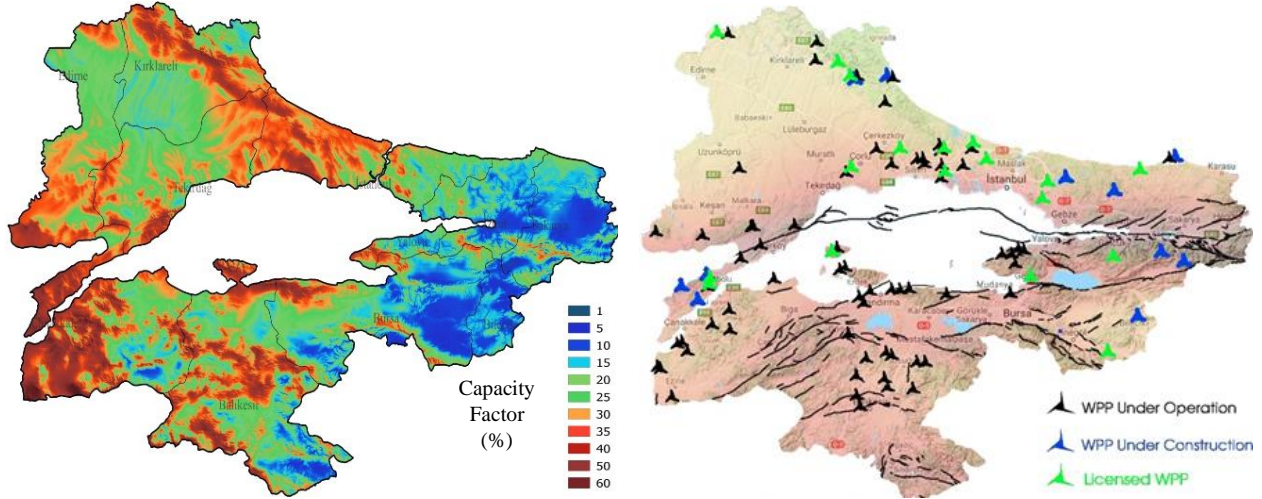


Figure 8. Wind energy capacity factor and earthquake risk maps for the Marmara (Marmara Bölgesi için rüzgar enerjisi kapasite faktörü ve deprem risk haritaları)

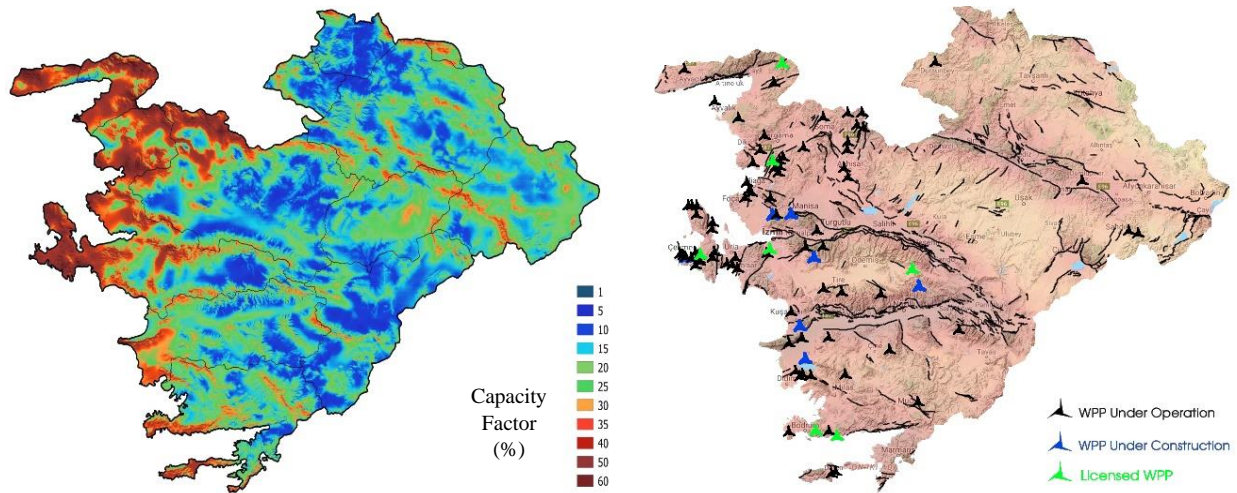


Figure 9. Wind energy capacity factor and earthquake risk maps for the Aegean (Ege Bölgesi için rüzgar enerjisi kapasite faktörü ve deprem risk haritaları)

It is known from the studies that earthquakes can cause more damage to structures close to the fault [31-34]. Since most earthquake codes do not have obvious statements about this issue, more care should be taken in the design of structures. For example, there is no statement on this subject in the Iran 2800 code [35]. Studies have determined that the seismicity of the northwestern region of Iran is

higher than the seismicity of the eastern Anatolian region of Turkey. Despite this, according to the Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings Standard [Iran National Standard No. 2800], there is no restriction on the distances of the structures to be constructed from the fault [36]. FEMA instructions include optimizations in structures close to the fault line. In the UBC 1997

(Uniform Building Code) regulation, the coefficients to be applied for buildings located 2 km, 5 km, and 10 km from the fault line are defined as different values [37]. Also, The Fault Law in the State of California, the USA, requires the creation of bonding boundaries. Since 1977, the banding limits have been 150 meters from the main fault, passed through distances of 60 to 90 meters from precisely defined minor faults. These criteria are valid only for strike-slip faults. However, these criteria have yet to be validated for locally complex faults, dip-slip reverses, and normal faults. When the regulations in Türkiye are examined, while the same acceleration coefficient is used in the same earthquake region in the Turkish Earthquake Code (TDY 2007) [38] spectrum, the spectral acceleration coefficients change according to the proximity to the fault in the latest published TBDY-2018 regulation. Earthquake ground motion spectra used in building design are calculated in a standard way, based on spectral acceleration coefficients, fault proximity coefficients, and local ground effect coefficients, for a 5% damping ratio, based on reference ground conditions for a certain earthquake ground motion level. In addition, in 2007, TDY only acts A_0 in the vertical direction, while in the new regulation, spectral acceleration coefficients, proximity to the fault, and local ground amplitudes change.

The data obtained as a result of the study were interpreted within the limitations of maps and regulations and supported by some statistical data. By giving the results obtained in the conclusion part, new sites for future wind power plants that have a low risk of earthquakes and are highly efficient in harnessing wind resources.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Within the scope of the study, firstly, a map with the existing WPPs locations was created. It was observed that 73.17% of the 198 WPPs used were found in the Aegean and Marmara regions. It is observed that these powers are generally clustered in İzmir-Manisa, Balıkesir-Bursa, Istanbul European Side, and Hatay-Antakya regions. In the study, statistical data on the distribution of wind power plants by earthquake regions were created. Accordingly, about 14% of the currently licensed

and actively produced WPP under construction were found to be in locations with peak ground acceleration values greater than 0-0.2 g, 41% 0.2-0.4 g, 40% 0.4-0.6 g, and 5% 0.6 g. It has been determined that there are 10 WPPs, especially in the North Anatolian Fault Zone and in the region with an acceleration value greater than 0.6 g. In the Marmara and Aegean regions, all WPPs, except Edirne and Kırklareli, are either in areas with high acceleration values or are quite close to fault lines. In addition, WPPs in the Hatay-Antioch region were found on/near the Antioch fault zone and the Eastern Anatolian Fault Zone. It is also seen that there are WPPs located in the Konya-Mersin line and Kayseri, where the earthquake risk is the least.

When the map showing the proximity of WPPs to active faults was examined, it was determined that only 27% of WPPs were located 25 km or more away from active faults. It has been observed that approximately half of the WPPs used in mapping are installed/constructed in areas with high earthquake risk. As a result of these facts, the following suggestions and recommendations were made:

- With the growth in global wind energy, wind tribunes will be built in seismically active regions; increasingly, the entire structure of the array and similarly designed simultaneously suggests that under extreme seismic events may be at risk of deterioration. Therefore, the behaviour of these structures needs to be studied in detail under realistic assessments of seismic loading.
- It is important to monitor the earthquake movements in the regions where WPPs are located and to control the elements/parts/resources that provide the structural integrity of the turbines in the power after intense movements.
- During prolonged ground motions such as earthquake storms, the structural elements and the connection parts that provide load transfer from these elements should be checked frequently, and precautions should be taken. It is known that efficiency is critical in the energy sector. For this reason, the correct use of the existing natural resources in the country is of great importance. With the

earthquake-appropriate design and modelling to be made before the construction of the WPP, the early detection of defects and structural defects that may occur later during the construction will prevent major losses.

- The concentration of WPPs to be newly constructed by relevant institutions/organizations in the Konya-Mersin line, Kayseri, Edirne, Kırklareli, and Mardin-Siverek regions will prevent earthquake and secondary risks (landslide, rockfall, flood, tsunami, and avalancheto be caused by earthquakes is considered.
- Regulations limiting structural use due to proximity to faults were examined. However, there are many different opinions. Turkey's earthquake regulations have no restrictions on bonding boundaries related to proximity to any fault. Policies and criteria regarding the establishment of these interdiction boundaries should be established.
- When establishing bonding boundaries, conditions should be developed according to the use of the building.
- In the design preparations of wind turbine power plants, it should be mandatory to make designs based on the assumption that they will be exposed to surface faulting and high earthquake effects in any direction.
- In addition to the wind energy efficiency maps used in the literature, regional maps requiring frequent business maintenance intervals may prevent such accidents.

The study shows a need to perform fatigue analysis on wind turbine towers when they are exposed to effects such as earthquakes and wind for a long time. It is essential to examine the behavior that may occur on the fasteners. As a result of these analyses, it will be possible to create maintenance-repair programs to be carried out in different periods for wind turbine power plants located in regions with high seismicity and to conduct studies on the benefits to be obtained.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

No conflict of interest was declared by the authors. The short version of this work was presented at the ACE 2021 conference.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. Bu çalışmanın kısa versiyonu ACE 2021 konferansında sunulmuştur.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors would like to thank Gazi University Academic Writing Application and Research Centre for proofreading the article.

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)

Anıl ÖZDEMİR: He created the maps, conducted a literature review, and performed the writing and reviewing process.

Haritaları oluşturmuş, literatür taraması yapmış, yazım ve düzeltme sürecini gerçekleştirmiştir.

Murat PINARLIK: He created graphs and tables, conducted a literature review, the writing and reviewing process.

Grafik ve tabloları oluşturmuş, literatür taraması yapmış, yazım ve düzeltme sürecini gerçekleştirmiştir.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Kumar, A., Sah, B., Singh, A.R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., et al. "A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609, (2017). (article)
- [2] Aydın, N.Y., Kentel, E., Duzgun, S., "GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey", *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews, 14:364–73 (2010). (article)
- [3] Teneler, G., “Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi. Türkiye’nin Enerji Görünümü, Ankara, 283–95, (2020). (report)
- [4] Kabak, M., Taskinoz, G., “Determination of the installation sites of wind power plants with spatial analysis: A model proposal”, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38:441–57 (2020). (article)
- [5] TWEA (Turkish Wind Energy Association). Turkish Wind Energy Statistics Report - January 2023. (report)
- [6] BP Global. Statistical Review of World Energy: Renewable Energy. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html.html#wind-energy>. (Access date: 05.04.2022). (web site)
- [7] Günay, E., Yildirim, S., “State of Turkey In Terms of Renewable Energy Capacity”, 5th International Kahramanmaraş Management, Economics and Politics Congress, 15-17 September 2022, Bursa-Türkiye. (congress)
- [8] Çalışkan, M., “Turkey’s Potential for Wind Energy and Current Investments”, Türkiye Wind Energy Potential and Current Investments Seminar, İstanbul (2011). (seminar)
- [9] Korkmaz, K.A., Çarhanoğlu, A.İ., Kural, M.E., “Sürdürülebilir enerji kaynaklarından rüzgâr türbinlerinin davranışlarının deprem etkisi altında incelenmesi”, İstanbul Commerce University Journal of Science, 7:1–13 (2008). (article)
- [10] Atımtay, E., Çerçeveli Ve Perdeli Betonarme Sistemlerin Tasarımı 1-2. 1st and 2nd ed. Ankara: METU Press (2001). (book)
- [11] Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes, METU. (report)
- [12] <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/kahramanmaraş-merkezli-depremlerin-ardından-38-bin-artci-sarsinti-yasandi/2906348> (Access date: 13.07.2023). (web site)
- [13] Yazıcıoğlu, H., Tanrıku, M., Johannes, C., Haklıdır, F.T., “Pre-Feasibility Study on the Offshore Wind Energy Capacity Assessment of Turkish Seas”, Enerji IQ, Ankara, 1–5 (2019). (article)
- [14] He, M., Li, Z., Ma, R., Huang, D., Liu, K., Pei, Z., “Experimental Investigation and On—Site Measurement of Reverse—Balanced Flange Connections in Wind Turbine Towers”, Advances in Structural Engineering, 18:1215–25 (2015). (article)
- [15] Ma, Y., Martinez-Vazquez, P., Baniotopoulos, C., “Wind turbine tower collapse cases: A historical overview”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 172:547–55 (2019). (article)
- [16] www.caithnesswindfarms.co.uk. Summary of Wind Turbine Accident Data to 31 March 2021. <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf> (Access date: 05.01.2022). (web site)
- [17] Nielsen, J.S., Risk-Based Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines, PhD Thesis, Aalborg University, Department of Civil Engineering, Denmark, (2013). (thesis)
- [18] Chou, J.S., Tu, W.T., “Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower”, Engineering Failure Analysis, 18:295–313 (2011). (article)
- [19] Zhang, N., The Frequent Wind Turbine Fire and Collapse Accidents Raising Concerns. <http://finance.sina.com.cn/chanjing/b/20101008/14318747248.shtml> (Access date: 05.04.2022). (web site)
- [20] Backstrand, J.; Hurtig, A. Final Report RO 2017: 01; Statens Haverikommission: Stockholm, Sweden, (2017). (report)

- [21] Ciang, C.C., Lee, J.R., Bang, H.J., “Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods”, *Measurement Science and Technology*, 19:12200 (2008). (article)
- [22] Ghoshal, A., Sundaresan, M.J., Schulz, M.J., Pai, P.F., “Structural health monitoring techniques for wind turbine blades”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85:309–24 (2000). (article)
- [23] Bas, J., Carriveau, R., Cheng, S., Newson, T., “Strain response of a wind turbine tower as a function of nacelle orientation”, *BIONATURE 2012: The Third International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies*, IARIA St. Maarten, 12–8 (2012). (conference)
- [24] Sheng, S., O’Connor, R., “Reliability of wind turbines”, *Wind Energy Engineering*, Elsevier, 299–327 (2017). (article)
- [25] Nuta, E., Christopoulos, C., Packer, J.A., “Methodology for seismic risk assessment for tubular steel wind turbine towers: application to Canadian seismic environment”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38:293–304 (2011). (article)
- [26] Myers, A.T., Gupta, A., Ramirez, C.M., Chioccarelli, E., “Evaluation of the Seismic Vulnerability of Tubular Wind Turbine Towers”, *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, 24–8 (2012). (conference)
- [27] Sadowski, A.J., Camara, A., Málaga-Chuquitaype, C., Dai, K., “Seismic analysis of a tall metal wind turbine support tower with realistic geometric imperfections”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46:201–19 (2017). (article)
- [28] Bozyigit, B., Bozyigit, I., Prendergast, L. J., “Analytical approach for seismic analysis of onshore wind turbines considering soil-structure interaction”, *Structures*, 51:226-241 (2023). (article)
- [29] TWEA (Turkish Wind Energy Association). *Turkish Wind Energy Statistics Report - January 2022*. (report)
- [30] Republic of Türkiye Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency. *Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Ankara (2018). (report)
- [31] Korkmaz, H., “Antakya’da zemin özellikleri ve deprem etkisi arasındaki ilişki”, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 4 (2), 49-66 (2006). (article)
- [32] Kundak, S., Türkoğlu, H., “İstanbul’da Deprem Riski Analizi”, *İtüdergisi/A*, 6(2) (2010). (article)
- [33] Nemutlu, Ö.F., Sarı, A., “Comparison of Turkish Earthquake Code in 2007 with Turkish Earthquake Code in 2018. In *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018)*, Diyarbakır, 568, 76 (2018). (conference)
- [34] Demirtaş, R., “Yerleşim ve yapı güvenliği açısından diri faylardan ne kadar uzaklaşılmalı?”, (Antakya ve Osmaniye depremselliği ve kentleşmeye etkileri), *TMMOB. 26-27 Haziran, Konferanslar Serisi: 1, Jeoloji Odası Yayınları, No: 76*, 46-67, Ankara (2003). (conference)
- [35] Building and Housing Research Center-BHRC, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard No. 2800, 3rd edn. Tehran, (2004)*. (report)
- [36] Malekzadeh, T., “Investigation and comparison of the seismicity of Northwest Iran (Azerbaijan) And East Anatolia”, PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara University, (2007). (thesis)
- [37] Code UB, *International Council of Building Code Officials (UBC-97)*. Whittier, CA, (1997). (book)
- [38] Ministry of Public Works and Settlement, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Ankara, (2007). (report)

The Statistical Analysis on Physical and Rheological Properties of the Bitumen Modified with CR+SBS+Sasobit

Yunus ERKUŞ^{1*}  Baha Vural KÖK² 

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

²Firat University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

Article Info

Research article
Received: 25/01/2023
Revision: 25/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Bitumen
Crumb Rubber
SBS
Sasobit
Statistics

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/01/2023
Düzeltilme: 25/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Bitüm
Öğütülmüş Araç Lastiği
SBS
Sasobit
İstatistik

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The variation of the experimental results with the additive ratios in the three added binders was statistically analyzed. Significant correlations were found between additive ratios and experimental results. / Üç katkılı bağlayıcılarda deney sonuçlarının katkı oranlarıyla değişimi istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Katkı oranları ve deney sonuçları arasında önemli ilişkiler olduğu tespit edilmiştir.

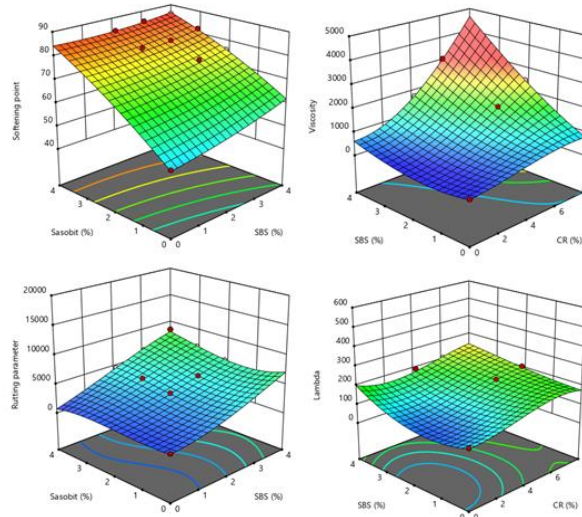


Figure A: Effect of additive ratios on experiments / Şekil A: Katkı oranlarının deneyler üzerindeki etkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Sasobit increased the workability of the binder and decreased its temperature sensitivity./Sasobit bağlayıcıların işlenebilirliğini artırdı ve sıcaklık hassasiyetini azalttı.
- SBS has increased the rutting resistance of the binders./SBSbağlayıcıların tekerlek izi direncini artırdı.
- CR contributed to the low temperature performance of the binders./CR bağlayıcıların düşük sıcaklık performansına katkı sundu.

Aim (Amaç): The aim of this study is to make a statistical evaluation of bituminous binders modified with CR, SBS and Sasobit./ Bu çalışmanın amacı, CR, SBS ve Sasobit ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların istatistiksel bir değerlendirmesini yapmaktır.

Originality (Özgünlük): The effectiveness of the additives used in bitumen modification was statistically and experimentally consistent./ Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkıların etkinliği istatistiksel ve deneysel olarak örtüşmüştür.

Results (Bulgular): The relationship between softening point-lambda and viscosity-rutting parameter was very important./ Yumuşama noktası-lambda ve viskozite-rutting parametresi arasındaki ilişki çok önemlidir.

Conclusion (Sonuç): Significant relationships were found between additive percentages and softening point, viscosity, rutting parameter and lambda values. The p value was 0.001 in all models./ Katkı yüzdeleri ile yumuşama noktası, viskozite, tekerlek izi parametresi ve lambda değerleri arasında anlamlı ilişkiler bulunmuştur. Tüm modellerde p değeri 0.001'dir.



The Statistical Analysis on Physical and Rheological Properties of the Bitumen Modified with CR+SBS+Sasobit

Yunus ERKUŞ^{1*} Baha Vural KÖK²

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

²Firat University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

Article Info

Research article
Received: 25/01/2023
Revision: 25/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Bitumen
Crumb Rubber
SBS
Sasobit
Statistics

Abstract

In this study, crumb rubber (CR), styrene-butadiene-styrene (SBS) and FT-Paraffin (Sasobit) additives modified bitumen binders were statistically investigated. The data set consisting of 32 binders modified by pure, CR, SBS, Sasobit and CR+SBS+Sasobit was studied. While additive ratios were defined as independent variables, results obtained from softening point, viscosity, dynamic shear rheometer and bending beam rheometer experiments were defined as dependent variables. Experiment results were analyzed individually and collectively using response surface methodology and pearson correlation methods. When the experiments were evaluated, very important relationships were found between additives rates and all experimental results. Actual values and estimated values obtained as a result of statistical analysis overlapped. It was determined that there were strong relationships between all experimental results when the pearson correlation between the experimental results was examined. Optimization was made according to the test results where the viscosity of 3000 cP (suitable workability), softening point and dynamic shear rheometer test results were maximum (superior high temperature performance) and the test data of bending beam rheometer was minimum (superior low temperature performance). According to this, CR, SBS and Sasobit rates were determined as 5.6%, 4% and 1%, respectively.

CR+SBS+Sasobit ile Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerine İstatistiksel Analiz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/01/2023
Düzeltilme: 25/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Bitüm
Öğütülmüş Araç Lastiği
SBS
Sasobit
İstatistik

Öz

Bu çalışmada, kırıntı kauçuk (CR), stiren-bütadien-stiren (SBS) ve parafin (Sasobit) katkıları ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar istatistiksel olarak incelenmiştir. Saf, CR, SBS, Sasobit ve CR+SBS+Sasobit ile modifiye edilmiş 32 bağlayıcıdan oluşan veri seti incelenmiştir. Katkı oranları bağımsız değişkenler olarak tanımlanırken, yumuşama noktası, viskozite, dinamik kesme reometresi ve eğilme kırışi reometresi deneylerinden elde edilen sonuçlar bağımlı değişkenler olarak tanımlanmıştır. Deney sonuçları, yanıt yüzeyi metodolojisi ve pearson korelasyon yöntemleri kullanılarak tek tek ve toplu olarak analiz edilmiştir. Deneyler değerlendirildiğinde, katkı oranları ile tüm deneysel sonuçlar arasında çok önemli ilişkiler bulunmuştur. Gerçek değerler ile istatistiksel analiz sonucunda elde edilen tahmini değerler örtüşmüştür. Deney sonuçları arasındaki pearson korelasyonu incelendiğinde tüm deney sonuçları arasında güçlü ilişkiler olduğu tespit edildi. Viskozite 3000 cP (uygun işlenebilirlik), yumuşama noktası ve dinamik kayma reometresi test sonuçlarının maksimum (üstün yüksek sıcaklık performansı) ve eğilme kırışi reometresi test sonucunun minimum (üstün düşük sıcaklık performansı) olduğu test verilerine göre optimizasyon yapılmıştır. Buna göre CR, SBS ve Sasobit oranları sırasıyla %5.6, %4 ve %1 olarak belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Bitumen is extensively used as a binder in road pavements owing to its favorable physical and rheological properties. By transferring these properties of bitumen to asphalt mixtures, it enables safe, economical and comfortable road

construction. Although bitumen and hot bituminous mixtures are frequently used in asphalt road construction, they are destroyed before completing their service life due to heavy vehicle traffic and climatic reasons. In order to prevent this situation, bitumen and asphalt are modified with various additives. These additives can be selected from

artificial, natural, recycling and waste materials. The criteria sought here are to rise the performance of bitumen and asphalt, to contribute to the natural environment and to be economical. But most of the time, it is not possible to meet all of these criteria with a single additive. In this case, besides the individual use of the additives, their multiple uses have started to be the subject of studies. Undoubtedly, styrene-butadiene-styrene (SBS) comes first among these additives. While SBS increases softening point, viscosity, rutting parameter, creep stiffness values of bituminous binders, it decreases penetration values. SBS modified asphalt mixtures improve permanent deformation at high temperature, moisture, aging and crack resistance at low temperature [1-6]. However, with the use of high rates of SBS, the cost increases and the workability decreases [7]. Therefore, the additives that can be used with SBS have been the subject of study. Crumb rubber (CR) obtained from ground vehicle tires have been used alternatively as a material. CR provides benefits in waste management in terms of environmental benefits and lowering the cost of bitumen. CR increases softening point, viscosity, rutting parameter values of bituminous binders whereas it decreases penetration and creep stiffness values. Moreover, CR additived bitumen show close thermal and aging sensitivity with SBS additived bitumen, whereas showing less moisture sensitivity than SBS additived bitumen [8-12]. As a result of the use of CR and SBS, workability problems occur with increasing viscosity. To prevent this situation, warm mix additives are used. At the beginning of these contributions is FT-paraffin (Sasobit). Sasobit not only reduces the viscosity, but also increases the softening point and rutting parameter values [13-16]. Considering the individual and combined use of Sasobit and SBS additives in bitumen modification, Sasobit provides superior properties to bituminous binders in terms of temperature sensitivity, while SBS provides superior properties to bitumen in terms of rutting parameter. The combined use of additives not only reduced the viscosity, but also increased the performance of the bituminous binder. [17]. When the rheological properties of Sasobit+CR modified bituminous binders are examined, the use of additives improves the low temperature performance of the binder. In addition, the resistance of the binder against permanent deformations at high temperatures increases [18]. The new investigation implicates studies of bitumen and asphalt using the Response Surface Method (RSM). RSM is a statistical approach that uses quantitative information from appropriate tests to construct many regression equations that correlate the determinants with the

empirical results. It is a set of methods used to develop a variety of experimental designs and to determine the connections between the empirical factors and the responses. The optimal conditions are then calculated from these relationships. It is especially useful for evaluating data with many inputs and outputs, as in this study. With this method, the experiments are evaluated not only individually but also together and optimum conditions are determined. Therefore, it helps to obtain multifunctional binders, not just single-purpose binders.

The aim of this study is to make a statistical evaluation of bituminous binders modified with CR, SBS and Sasobit. In this context, using response surface methodology (RSM), the relationship between additive ratios and test results is examined and optimization is made. In addition, the relationship between different experimental results is determined with the help of the Pearson correlation method.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

B 160/220 penetration class pure bitumen was used in the study. As additive material, crumb rubber obtained from ground vehicle tires, Kraton D-1101® type styrene-butadiene-styrene (SBS) and FT-Paraffin (Sasobit®), which is preferred in warm mixtures (Figure 1), were used. The rate of CR was %4, %6, %8, SBS and Sasobit was %2, %3, %4 by weight of bitumen in the single and triple usage. Softening point (ASTM D36 standard), viscosity (ASTM D4402 standard), dynamic shear rheometer (AASHTO T315 standard) and bending beam rheometer (AASHTO T313 standard) tests were applied to the binders. While evaluating the rutting parameter ($G^*/\sin\delta$) data in the dynamic shear rheometer experiment at 64 °C, lambda (λ) data, which is the m-value ratio of the creep stiffness, was taken into account in the bending beam rheometer experiment at -10 °C. Softening point test are used to determine the consistency and temperature sensitivity of bitumen. Viscosity is the resistance to movement, that is, to rotation. Viscosity test is done to determine the workability of binders. Viscosities of the binders at 135 °C are expected not to exceed 3000 cP in terms of suitable workability. With the help of this test, the mixing and compaction temperatures of the asphalt are determined. The medium and high temperature performance of the binders is determined by the dynamic shear rheometer test, while the low temperature performance is determined by the beam bending rheometer test.

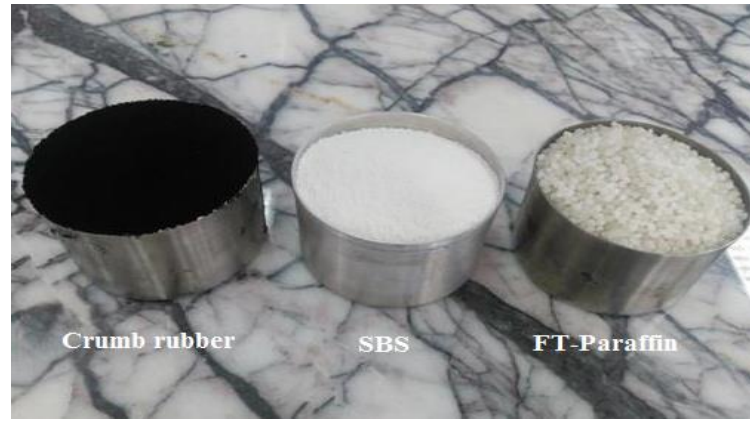


Figure 1. Materials utilized in the research. (Çalışmada kullanılan deneyler)

In the research, an empirical plan was designed considering statistical regression using the response surface methodology (RSM) method, and optimal states were assessed by response functions. In empirical design, it is necessary to decide the effective parameters to obtain optimum results with less number of tests. In the RSM method, results are achieved economically, in a short time, with maximum efficiency and with less effort. With this method, the effects of the independent variables on the response functions are evaluated and optimization is made [19–22]. In this study, the additive rates were taken as the independent variable while the experimental results were taken into account as response functions in the RSM method.

3.THE STATISTICAL ANALYSIS RESULTS (İSTATİKSEL ANALİZ SONUÇLARI)

RSM was used to study the effects of the additive on softening point, viscosity at 135°C, rutting parameter and lambda and to study the combined effects of three factors; percentage of additives as independent variables. To study the impact of the factors, 32 experimental results (Table 1) were run in a design matrix using the CCD (Central Composite Design) method. Design Expert 12 software was used to design the tests in this study. As seen in Table 1, the ratios of binders with single additive material used in the study were chosen to be compatible with triple modifications. Almost all of the three additives binders in the table gave better results than the 5% SBS modified binder, which is frequently used in practice and laboratory. In triple modifications, better results were also obtained than the 7% SBS modification, which is the maximum that can be used due to the viscosity limit [23].

Table 1. Test data of binder (Bağlayıcıların test dataları)

CR (%)	SBS (%)	Sasobit (%)	Softening point (°C)	Viscosity at 135 °C (cP)	Rutting parameter (G*/sinδ)	Lambda (λ)
0	0	0	42.1	262	539	62.6
4	0	0	51.2	525	1384	63.3
6	0	0	53.1	612.5	2030	60.3
8	0	0	55.4	862.5	2295	58.4
0	2	0	46.65	562.5	1098	75.7
0	3	0	51.7	794	1717	93.7
0	4	0	54.4	1125	2662	112.8
0	0	2	62.9	250	1213	113.4
0	0	3	68.7	237.5	1668	161.9
0	0	4	78.5	212.5	2137	196.8
4	2	2	69.1	875	3471	124.3
4	2	3	80.1	834	4344	180.7
4	2	4	84.2	787	4564	209.5
4	3	2	75	1275	4817	134.5
4	3	3	80.1	1200	5420	193.1
4	3	4	85.4	1150	6226	238.0
4	4	2	76	1750	5955	191.2
4	4	3	82.1	1700	6933	250.3

4	4	4	85.9	1625	8642	276.1
6	2	2	72.5	1688	5935	183.4
6	2	3	80.7	1613	6877	232.6
6	2	4	84.5	1488	7872	251.1
6	3	2	75.3	2250	8574	190.0
6	3	3	80.8	2163	10129	235.2
6	3	4	85.7	2100	12227	277.7
6	4	2	77.8	3063	10786	207.9
6	4	3	82.9	2925	13320	277.7
6	4	4	86.7	2713	14429	299.7
8	2	2	73.3	2463	7678	205.8
8	2	3	80.8	2275	9728	239.9
8	2	4	85.4	2150	10777	256.1
8	3	4	86.8	3075	15825	268.5

3.1. The Statistical Result of Softening Point

Test (Yumuşama Noktası Deneyinin İstatiksel Sonuçları)

The CR, SBS and Sasobit ratios were used as independent variables and softening point test data as response function in the design made with the RSM method as seen in Figure 2. Statistical results obtained from the softening point test data were given in Table 2. The significance of the model was represented by the high F-value and low P-value (<0.05) for F and P, showing that the factor and corresponding factors agree very well. The R2 value > 0.80 showed that the prepared model fits well and has good significant agreement between the responses (actual and predicted). In addition, the standard deviation (Std. Dev.) for the coefficient of variance (C.V.%) after analysis for all models considered was far less than the obtained mean

values, which also indicates the adequacy of the analysis of variance. The lower value of the generated model's standard deviation compared to its mean indicates its variance with respect to the test data. The experimental data therefore led to fewer ambiguities for the generated model. The P-value as low as 0.0001 indicated that the model was very important. Strong relationships were found between the additive ratio and the softening point. Quadratic model was used in the analysis. R2 (0.996) value close to 1 showed that the values obtained with the real results and the established model are very close. The standard deviation (1.01) and coefficient of variance (1.38) proved that the error margin of the model in the study was low. The changes in the softening point depending on the Sasobit and SBS ratios were given in Figure 3. Sasobit was the most influential on the softening point experimental results.

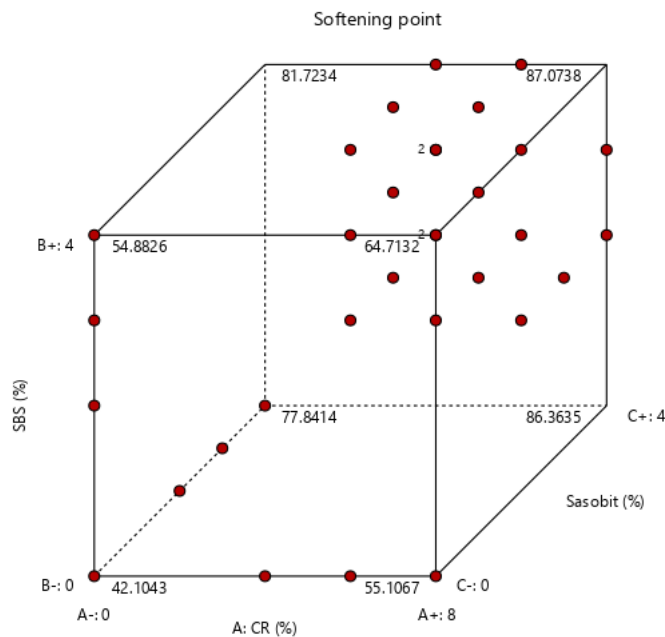


Figure 2. The cube design according to the softening point data (Yumuşama noktası verileri küp tasarımı)

Table 2. Statistical results of softening point test data (Yumuşama noktasıyla verileri istatistiksel sonuçları)

Transform	Source	P-value	F-value	Std. Dev.	R ²	C.V.%
Power	Quadratic	0.0001	604.53	1.01	0.9960	1.38

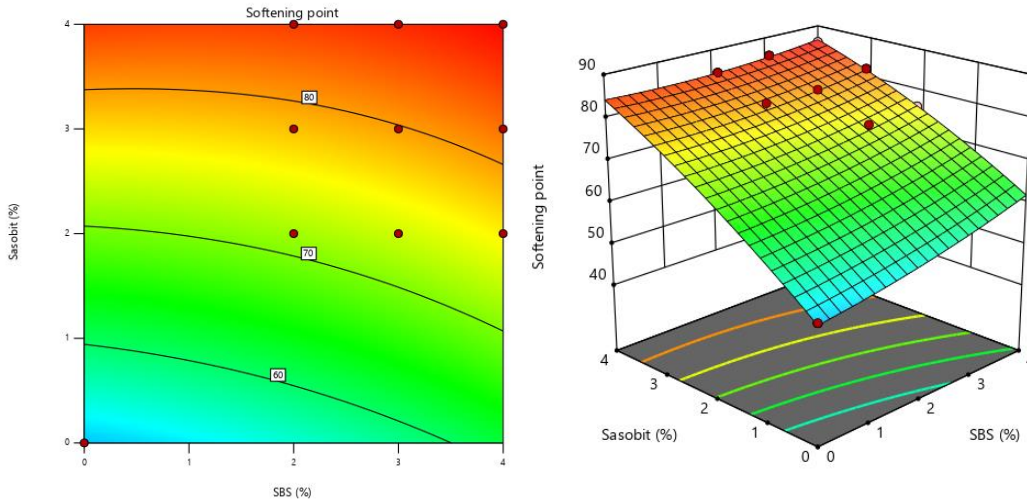


Figure 3. Change of softening point with Sasobit and SBS ratio (Sasobit ve SBS oranları ile yumuşama noktası değişimi)

Figure 4 shows not only the fit but also the distribution of the differences between the actual and the predicted data. As can be seen in the figure, the actual and estimated values are very close to each other. This has proven the close relationship

between the factors and the suitability of the established model. In addition, an equation (Formula 1) was determined for the viscosity estimation based on the additive ratios. Here, A: CR ratio, B: SBS ratio, and C: Sasobit ratio.

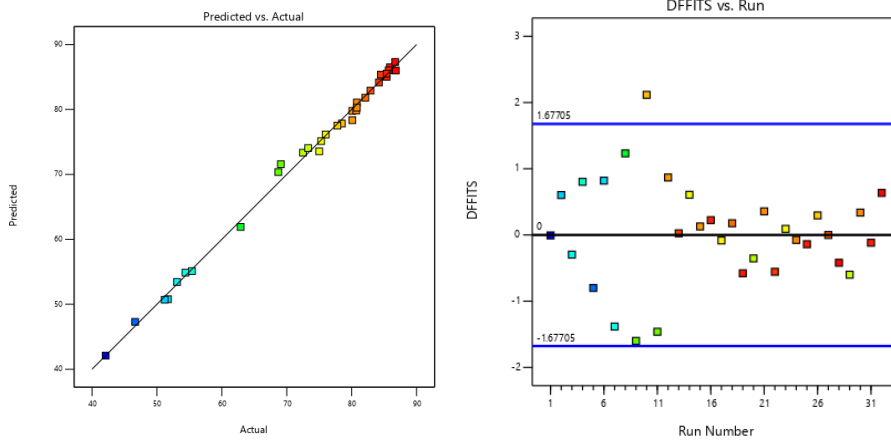


Figure 4. The diagnostic plots according softening point (Yumuşama noktasına göre diagnostik grafikler)

$$\text{Softening point} = 42.1 + 2.68 * A + 1.99 * B + 10.88 * C - 0.1 * AB - 0.14 * AC - 0.56 * BC - 0.13 * A^2 + 0.29 * B^2 - 0.49 * C^2 \quad (1)$$

3.2. The Statistical Result of Viscosity Test
(Yumuşama Noktası Deneyinin İstatistiksel Sonuçları)

The CR, SBS and Sasobit ratios were used as independent variables and viscosity test data as response function in the design made with the RSM method as seen in Figure 5. Statistical results obtained from the viscosity test data were given in

Table 3. The P-value as low as 0.0001 indicated that the regression model was very important. Strong relationships were found between the ratio of additive and the viscosity. Cubic model was used in the analysis. R2 (0.9987) value close to 1 showed that the values obtained with the real results and the established model are very close. The standard deviation (49.63) and coefficient of variance (3.41)

proved that the error margin of the model in the study was low. The changes in the viscosity depending on the CR and SBS ratios were given in

Figure 6. SBS was the most influential additive on the viscosity experimental results.

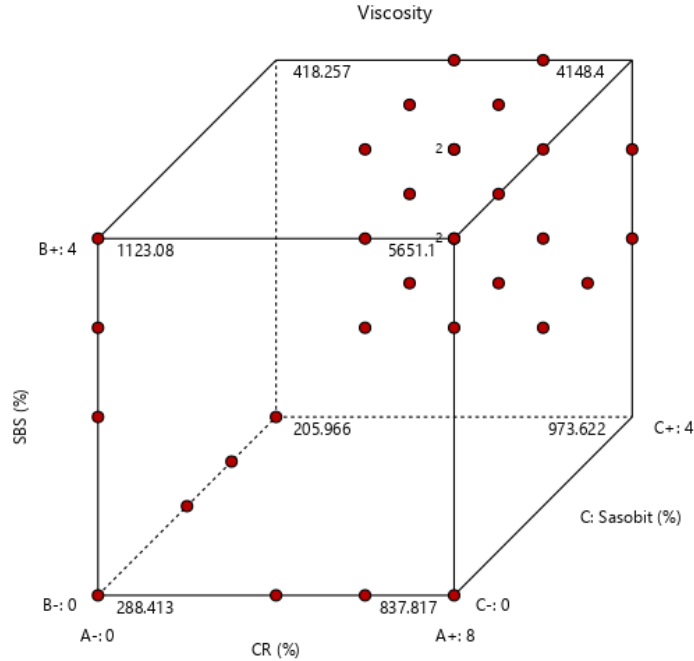


Figure 5. The cube design according to the viscosity data (Viskozite verileri küp tasarımı)

Table 3. Statistical results of viscosity test data (Viskozite verileri istatistiksel sonuçları)

Transform	Source	P-value	F-value	Std. Dev.	R ²	C.V.%
Power	Cubic	0.0001	500.69	49.63	0.9987	3.41

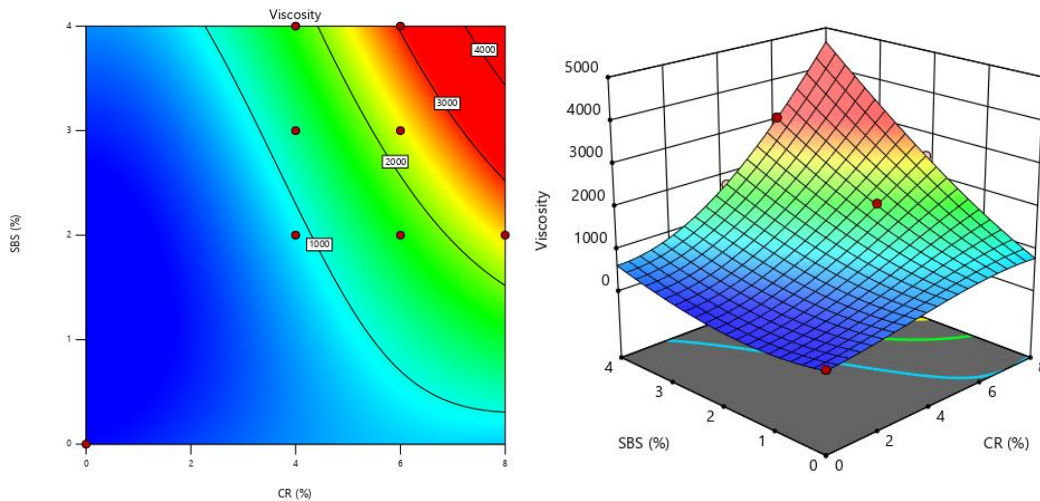


Figure 6. Change of viscosity with Sasobit and SBS ratio (Sasobit ve SBS oranları ile viskozite değişimi)

Figure 7 shows not only the fit but also the distribution of the differences between the actual and the predicted data. As can be seen in the figure, the actual and estimated values are very close to each other. This has proven the close relationship

between the factors and the suitability of the established model. In addition, an equation (Formula 2) was determined for the viscosity estimation based on the additive ratios. Here, A: CR ratio, B: SBS ratio, and C: Sasobit ratio.

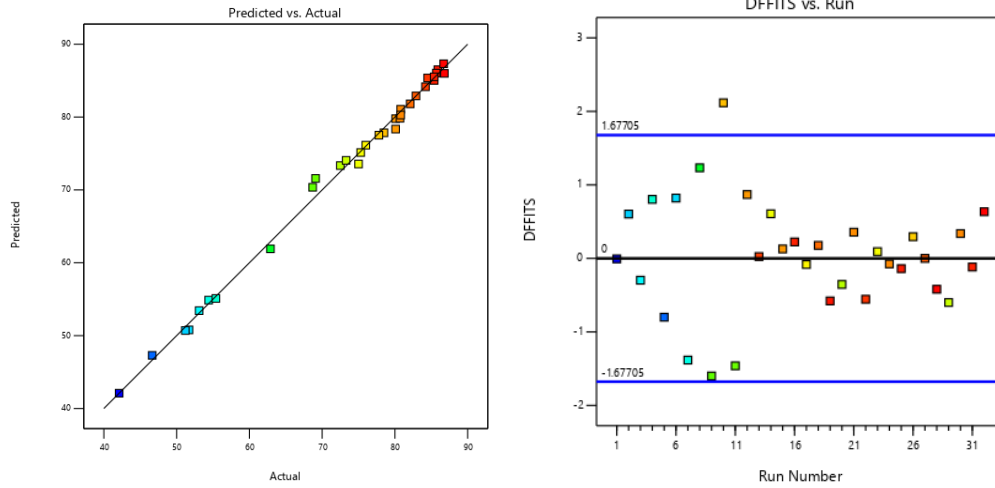


Figure 7. The diagnostic plots according viscosity (Viskoziteye göre diagnostik grafikler)

$$\begin{aligned} \text{Viscosity} = & 288.41 - 54.09 * A - 22.88 * B - 158.09 * C + 11.38 * AB + 46.02 * AC - 151.05 * BC + 33.88 \\ & * A^2 + 88.53 * B^2 + 92.64 * C^2 - 7.94 * ABC + 15.22 * A^2B - 6.36 * A^2C - 2.2 * AB^2 + 2.93 * \\ & AC^2 + 19.46 * B^2C + 8.58 * BC^2 - 2.32 * A^3 - 7.66 * B^3 - 14.57 * C^3 \end{aligned} \quad (2)$$

3.3. The Statistical Result of Dynamic Shear

Rheometer Test (Dinamik Kesme Reometresi Deneyinin İstatiksel Sonuçları)

The CR, SBS and Sasobit ratios were used as independent variables and dynamic shear rheometer test data (rutting parameter) as response function in the design made with the RSM method as seen in Figure 8. Statistical results obtained from the rutting parameter data were given in Table 4. A P-value as low as 0.0001 indicated that the regression model was very important. Strong relationships were

found between the ratio of additive and the rutting parameter. Cubic model was used in the analysis. R2 (0.997) value close to 1 showed that the values obtained with the real results and the established model are very close. The standard deviation (371.05) and coefficient of variance (5.9) proved that the error margin of the model in the study was low. The changes in the rutting parameter depending on the Sasobit and SBS ratios were given in Figure 9. SBS was the most influential additive on the rutting parameter experimental results.

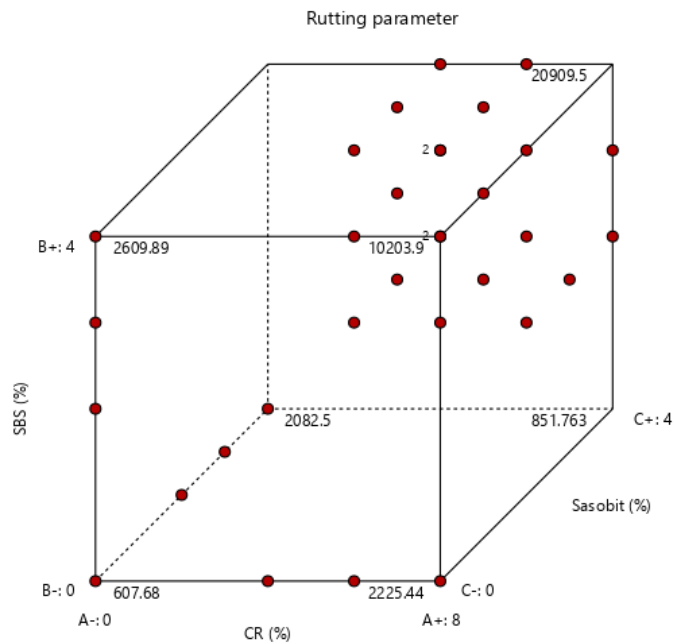


Figure 8. The cube design according to the rutting parameter data (Tekerlek izi parametresi verileri küp tasarımı)

Table 4. Statistical results of dynamic shear rheometer test data (Dinamik kesme reometresi verileri istatistiksel sonuçları)

Transform	Source	P-value	F-value	Std. Dev.	R ²	C.V.%
Power	Cubic	0.0001	213.14	371.05	0.9970	5.90

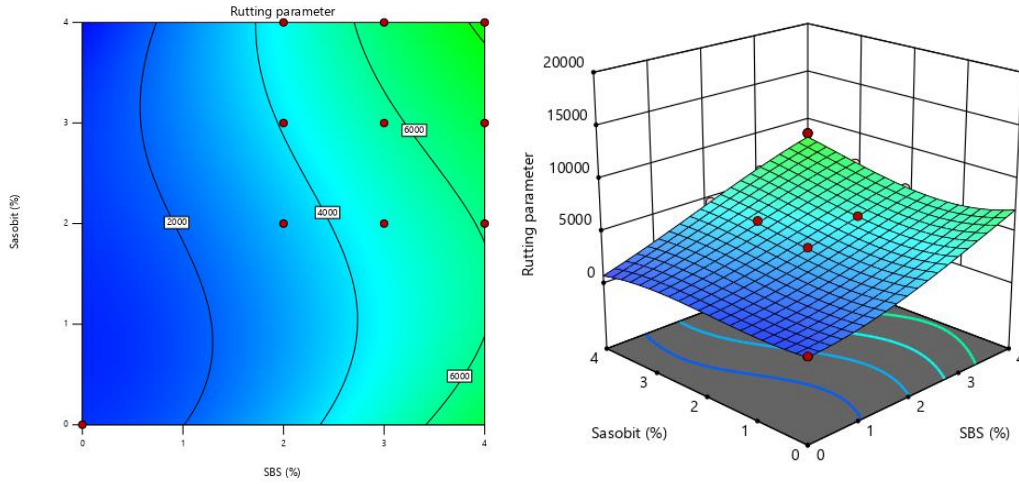


Figure 9. Change of rutting parameter with Sasobit and SBS ratio (Sasobit ve SBS oranları ile tekerlek izi parametresi değişimi)

Figure 10 shows not only the fit but also the distribution of the differences between the actual and the predicted data. As can be seen in the figure, the actual and estimated values are very close to each other. This has proven the close relationship between the factors and the suitability of the

established model. In addition, an equation (Formula 3) was determined for the rutting parameter estimation based on the additive ratios. Here, A: CR ratio, B: SBS ratio, and C: Sasobit ratio.

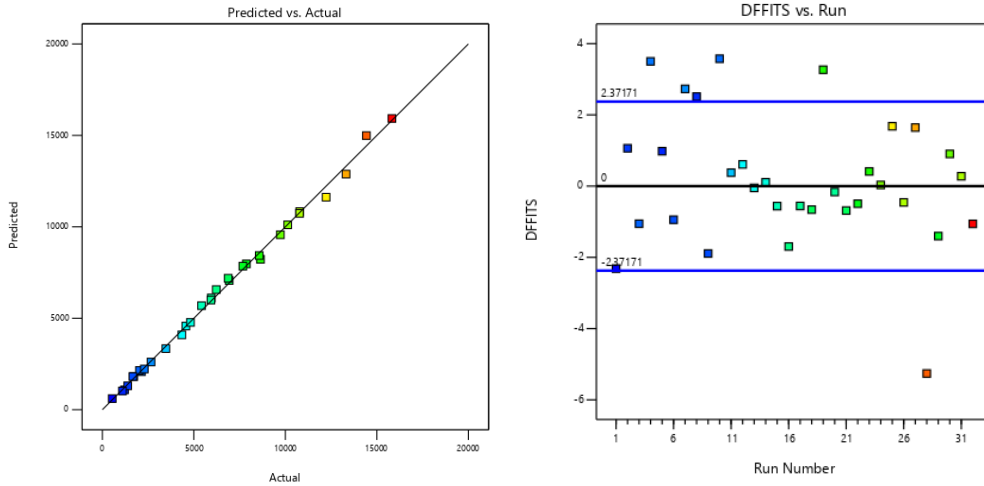


Figure 10. The diagnostic plots according to rutting parameter (Tekerlek izi parametresine göre diagnostik grafikler)

$$\text{Rutting parameter} = 607.68 - 395.47 * A - 458.83 * B - 669.74 * C + 226.61 * AB - 31.3 * AC - 770.44 * BC + 210.22 * A^2 + 426.57 * B^2 + 650.1 * C^2 + 162.17 * ABC - 13.27 * A^2B + 10.46 * A^2C + 16.58 * AB^2 - 35.36 * AC^2 - 60.68 * B^2C + 117.68 * BC^2 - 16.94 * A^3 - 46.68 * B^3 - 97.62 * C^3 \quad (3)$$

3.4. The Statistical Result of Bending Beam Rheometer Test (Kiriş Eğme Reometresi Deneyinin İstatistiksel Sonuçları)

The CR, SBS and Sasobit ratios were used as independent variables and bending beam rheometer test data (lambda) as response function in the design made with the RSM method as seen in Figure 11.

Statistical results obtained from the lambda data were given in Table 5. A P-value as low as 0.0001 indicated that the regression model was very important. Strong relationships were found between the ratio of additive and the lambda. Cubic model was used in the analysis. R2 (0.9924) value close to 1 showed that the values obtained with the real

results and the established model are very close. The standard deviation (10.39) and coefficient of variance (5.61) proved that the error margin of the model in the study was low. The changes in the lambda depending on the CR and SBS ratios were given in Figure 12. CR was the most influential additive on the lambda experimental results.

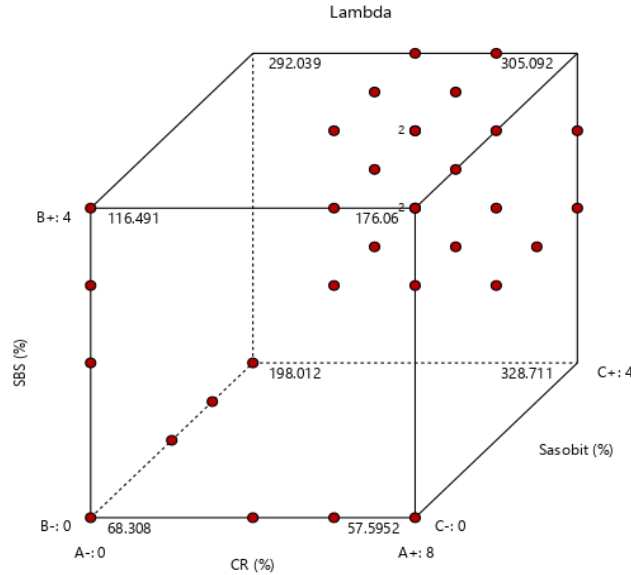


Figure 11. The cube design according to the lambda data (Lamda verileri küp tasarımı)

Table 5. Statistical results of bending beam rheometer test data (Kiriş eğme reometresi verileri istatistiksel sonuçları)

Transform	Source	P-value	F-value	Std. Dev.	R ²	C.V.%
Power	Cubic	0.0001	82.59	10.39	0.9924	5.61

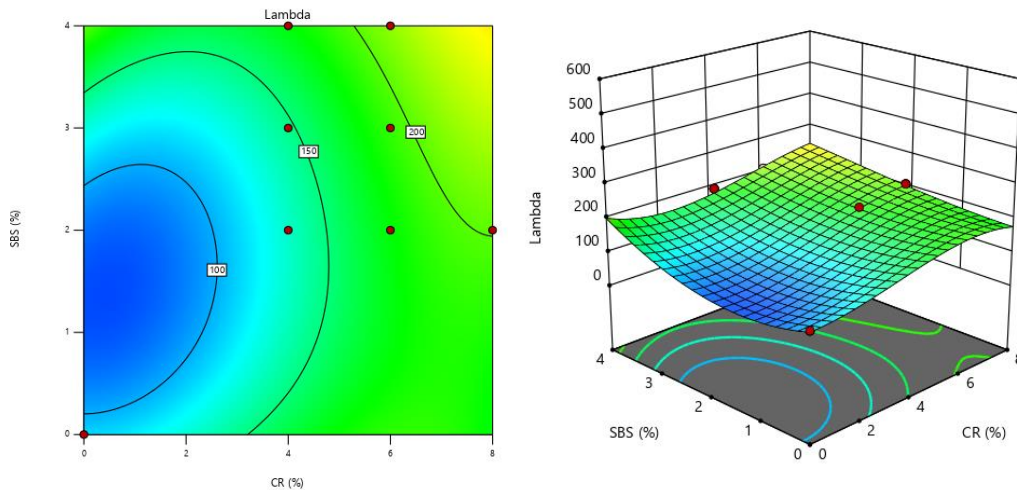


Figure 12. Change of lambda with Sasobit and SBS ratio (Sasobit ve SBS oranları ile lamda değişimi)

Figure 13 shows not only the fit but also the distribution of the differences between the actual and the predicted data. As can be seen in the figure, the actual and estimated values are very close to each other. This has proven the close relationship

between the factors and the suitability of the established model. In addition, an equation (Formula 4) was determined for the lambda estimation based on the additive ratios. Here, A: CR ratio, B: SBS ratio, and C: Sasobit ratio.

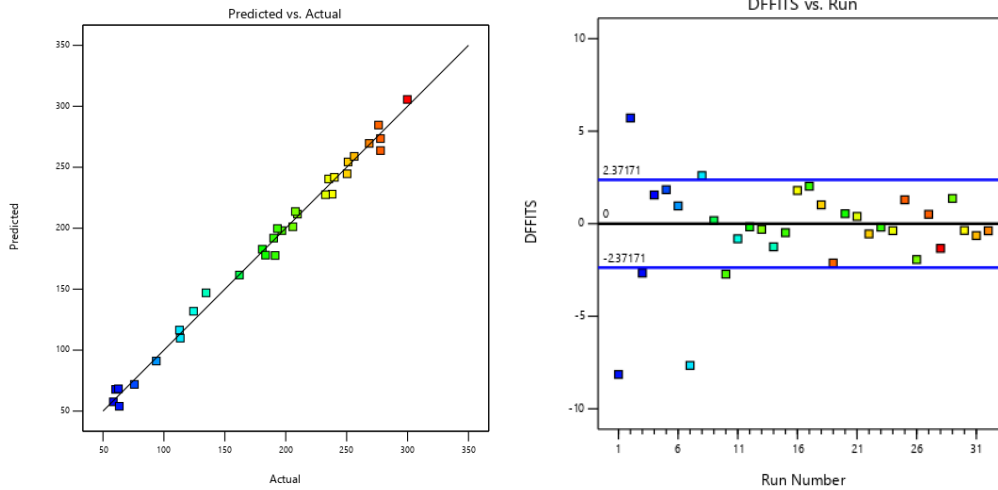


Figure 13. The diagnostic plots according lambda (Lamdaya göre diagnostik grafikler)

$$\begin{aligned} \text{Lambda} = & 68.31 - 24.83 * A - 13.89 * B - 27.01 * C + 1.54 * AB + 12.88 * AC - 16.76 * BC + 7.69 * A^2 \\ & + 9.2 * B^2 + 32.89 * C^2 - 1.47 * ABC + 1.04 * A^2B - 0.96 * A^2C - 1.92 * AB^2 - 0.19 * AC^2 + 6.18 \\ & * B^2C - 1.28 * BC^2 - 0.59 * A^3 - 0.68 * B^3 - 4.51 * C^3 \end{aligned} \quad (4)$$

3.5. The Statistical Result of Tests Evaluated

Together (Birlikte Değerlendirilen Deneylerin İstatiksel Sonuçları)

The softening point, viscosity, dynamic shear rheometry and bending beam rheometer test results of the binders were evaluated with the help of Pearson correlation method. The results obtained were given in Table 6. Highly congruent correlations were detected between the different experimental data. Moreover, it was determined that

there was a very significant correlation between softening point-bending beam rheometer (0.936) and viscosity-dynamic shear rheometer (0.935). This showed that binders with high softening point, that is, low temperature sensitivity, are resistant to low temperature deformations. On the other hand, it has been revealed that binders with high viscosity will also be resistant to high temperature permanent deformations. The rutting potential of asphalt mixtures obtained with these binders will be reduced as in the literature [7,17].

Table 6. Pearson correlation between experimental results (Deney sonuçları arasındaki Pearson korelasyonu)

		Softening point	Viscosity	Rutting parameter	Lambda
Softening point	Pearson Correlation	1	0.616**	0.761**	0.936**
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.000	0.000
	N	32	32	32	32
Viscosity	Pearson Correlation	0.616**	1	0.935**	0.857
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000
	N	32	32	32	32
Rutting parameter	Pearson Correlation	0.761**	0.935**	1	0.857**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.000

	N	32	32	32	32
Lambda	Pearson Correlation	0.936**	0.721**	0.857**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	
	N	32	32	32	32

The optimum solution to maximize the softening point, viscosity, rutting parameter values while minimize the lambda values was given in the Table 7 considering the lower and upper limits of the independent variables (additive contents) in the

research. According to the data set in the study and the percentage of additives used, it was decided that effect of Sasobit on softening point, SBS on viscosity and rutting parameter, and CR additives on the lambda were more dominant

Table 7. Optimization results according to experimental data and additive rates (Deney verileri ve katkı oranlarına göre optimizasyon sonuçları)

Test values	CR (%)	SBS (%)	Sasobit (%)	Result
Softening point	6.592	3.854	3.935	86.883
Viscosity	7.135	3.944	3.763	3522.468
Rutting parameter	7.999	3.873	2.597	15797.865
Lambda	2.287	0.641	0.063	42.58

Considering the 3000 cP viscosity value at 135 °C, which was required for the workability of bituminous binders, the results in the Table 8 were obtained when all the experimental data were optimized. Here, the lambda values were taken as the minimum while the softening point and rutting parameter values were taken as the maximum for optimization. It was aimed to obtain a binder with superior performance against high and low temperatures without workability problems. Thus,

suitable binder was selected for regions having large temperature differences considering low and high temperature performance together. Addition of 5.6% CR, 4% SBS and 1% Sasobit to the pure binder allowed the production of such a binder. In addition, the use of SBS additive at the maximum rate (4%) in optimization according to the additive percentages considered in the study showed that it was the most effective additive in all experimental parameters.

Table 8. Statistical results of bending beam rheometer test data (Kiriş eğme reometresi verileri istatistiksel sonuçları)

CR (%)	SBS (%)	Sasobit (%)	Viscosity	Softening point	Rutting parameter	Lambda
5.600	4.000	1.002	3000.000	70.927	8799.020	143.598

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, statistical analysis of pure, CR, SBS, Sasobit and CR+SBS+Sasobit modified binders was carried out according to the RSM method, taking into account the additive ratio and the

performance of the binders. In addition, the relationship between all performance criteria (softening point, viscosity, rutting parameter and lambda) was examined and optimization was made.

Significant relationships were found between additive percentages and softening point, viscosity, rutting parameter and lambda values. The p value was 0.001 in all models. This showed that the changes in the dependent factors were consistent with the changes in the independent factors. Moreover, the R2 value was approximately 0.99 in all models. In other words, the actual value and the estimated values obtained with the established model almost completely overlapped. When the experimental results were analyzed according to the Pearson correlation, significant relationships were found. The relationship between softening point-lambda and viscosity-rutting parameter was very important. Considering the most important benefits of the additives, Sasobit increased the workability of the binder and decreased its temperature sensitivity. SBS has increased the rutting resistance of the connectors. CR contributed to the low temperature performance of the binders. By using statistical analysis, the additive rates that serve the different properties of bitumen were determined. When all the test results were evaluated, the optimum additive ratio was determined as 5.6% CR, 4% SBS and 1% Sasobit. It was determined that the most effective additive material was SBS. Thanks to this analysis, the consistency of the experimental results was proven. In addition, the optimum ratios of additives that can be used in the field were determined.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by the project number 119M161 under the "TÜBİTAK 1002" program. The authors would like to thank TUBİTAK.

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)

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

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

Baha Vural KÖK: He analyzed the data and commented on the results.

Verileri analiz etmiş ve sonuçları yorumlamıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Aksoy A, Şamlioglu K, Tayfur S, Özen H. Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2005; 19: 11-18.
- [2] Kaya D, Topal A, Gupta J, McNally T. Aging effects on the composition and thermal properties of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen. *Construction and Building Materials*. 2020; 235: 117450.
- [3] Kim TW, Baek J, Lee HJ, Choi JY. Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2013; 48: 908-916.
- [4] Lu X, Isacsson U, Ekblad J. Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*. 2003; 36: 652-656.
- [5] Polacco G, Biondi D, Stastna J, Vlachovicova Z, Zanzotto L. Effect of SBS on rheological properties of different base asphalts. *Macromolecular Symposia*. 2004; 333-342.
- [6] Yılmaz M, Çeloğlu ME. Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures. *Construction and Building Materials*. 2013; 44: 533-540.
- [7] Yılmaz M, Kök BV. Determining the high temperature performance grade and workability of styrene-butadiene-styrene modified bituminous binders according to superpave system. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2008; 23: 811-819.
- [8] Del Barco-Carrión AJ, García-Travé G, Moreno-Navarro F, Martínez-Montes G, Rubio-Gámez MC. Comparison of the effect of recycled crumb rubber and polymer concentration on the performance of binders for asphalt mixtures. *Materiales de Construcción*. 2016; 66.
- [9] Picado-Santos LG, Capitão SD, Neves JM. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature

- review. *Construction and Building Materials*. 2020; 247: 118577.
- [10] Jamal M, Giustozzi F. Low-content crumb rubber modified bitumen for improving Australian local roads condition. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 271: 122484.
- [11] Attia M, Abdelrahman M. Enhancing the performance of crumb rubber-modified binders through varying the interaction conditions. *International Journal of Pavement Engineering*. 2009; 10: 423-434.
- [12] Navarro FJ, Partal P, Martínez-Boza FJ, Gallegos C. Influence of processing conditions on the rheological behavior of crumb tire rubber-modified bitumen. *Journal of applied polymer science*. 2007; 104: 1683-1691.
- [13] Akisetty CK, Lee SJ, Amirkhanian SN. High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*. 2009; 23: 565-573.
- [14] Edwards Y, Isacsson U. Wax in bitumen: Part II—characterization and effects. *Road materials and pavement design*. 2005; 6: 439-468.
- [15] Syroezhko AM, Baranov MA, Ivanov SN, Maidanova NV. Influence of natural additives and those synthesized by the Fischer-Tropsch method on the properties of petroleum bitumen and quality of floated asphalt. *Coke and Chemistry*. 2011; 54: 26-31.
- [16] Wasiuddin NM, Saha R, King W. Effects of a wax-based warm mix additive on lower Compaction Temperatures. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011; 4614-4623.
- [17] Kök BV, Yılmaz M, Akpolat M. Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS+ Sasobit modified binder. *Construction and Building Materials*. 2014; 63: 174-179.
- [18] Fazaeli H, Amini AA, Nejad FM, Behbahani H. Rheological properties of bitumen modified with a combination of FT paraffin wax (sasobit®) and other additives. *Journal of civil Engineering and management*. 2016; 22: 135-145.
- [19] Del Barco Carrion AJ, Subhy A, Rodriguez MAI, Presti DL. Optimisation of liquid rubber modified bitumen for road pavements and roofing applications. *Construction and Building Materials*. 2020; 249: 118630.
- [20] Aydemir EB, Ozkul MH. Investigation of effect of bitumen chemical composition, elastomeric polymer and paraffin wax additives on the properties of bitumen by using response surface method. *Construction and Building Materials*. 2020; 234: 117414.
- [21] Memon AM, Sutanto MH, Napiah M, Khan MI, Rafiq W. Modeling and optimization of mixing conditions for petroleum sludge modified bitumen using response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2020; 264: 120701.
- [22] Khairuddin FH, Yusoff NM, Badri K, Koting S, Choy PN, Misnon NA, Osmi SC. Design and optimization of polyurethane modified bitumen (PUMB) using response surface method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020.
- [23] Erkuş Y, Kök BV, Yılmaz M. Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives. *Construction and Building Materials*. 2020; 261: 120553.

Investigation of the Auxetic Behavior of an Original Lattice Structure Design

Nuriye Nur KAYA^{1,4*}, Cengiz ELDEM², İhsan TOKTAŞ³

¹ Department of Industrial Design Engineering, Gazi University, 06560 Ankara, Turkey

² Department of Industrial Design Engineering, Gazi University, 06560 Ankara, Turkey

³ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

⁴ Department of Industrial Product Design, Fırat University, 23300 Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 27/09/2023

Revision: 13/10/2023

Accepted: 14/10/2023

Keywords

Auxetic

Negative Poisson's ratio

Lattice structure

Novel auxetic structure

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/09/2023

Düzeltilme: 13/10/2023

Kabul: 14/10/2023

Anahtar Kelimeler

Auxetic

Negatif Poisson oranı

Kafes yapı

Yeni auxetic yapı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Using finite element analysis, the Poisson's ratio of newly created auxetic lattice structures with 2x4 and 4x4 matrices and 12 various geometric internal thicknesses was examined. / Bu çalışmada, 12 farklı geometri iç kalınlığına sahip 2x4 ve 4x4 matrisli olarak yeni tasarlanmış Auxetic latis yapıların Poisson oranı sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir.

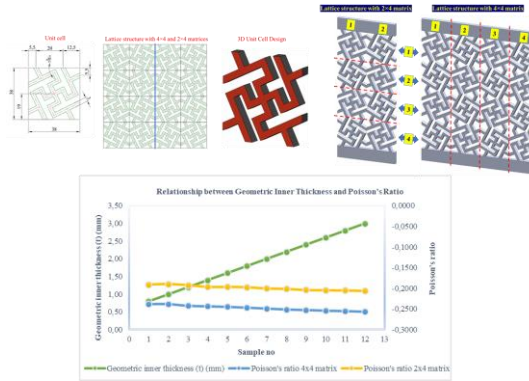


Figure A: The geometric internal thickness and Poisson's ratio of specified lattice systems are related. / **Şekil A:** Tasarlanan latis yapıların geometrik iç kalınlık ile Poisson oranı ilişkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- A novel auxetic lattice structure geometry, not previously seen in the literature, has been created and modeled. / Literatürde bulunmayan özgün bir auxetic latis yapı geometrisi tasarlanmış ve modellenmiştir.
- All of the designs examined have a negative Poisson's ratio. / İncelenen tasarımların hepsi negatif Poisson oranına sahiptir.
- In the auxetic designs under consideration, the Poisson's ratio values got closer to -0.5 as the geometric inner thickness rose. / İncelenen auxetic tasarımlarda geometrik iç kalınlığı arttıkça, Poisson oranı değerleri -0,5'e yaklaşmıştır.

Aim (Amaç): The purpose of this work is to design, examine, and establish the existence of a novel auxetic structure with a negative poisson's ratio. / Bu çalışmanın amacı, literature özgün bir Auxetic yapı tasarlayıp analizlerini gerçekleştirerek negative poisson oranına sahip olduğunu belirlemektir.

Originality (Özgünlük): A novel auxetic lattice structure, not previously seen in the literature, was constructed and introduced in this study. / Bu çalışmada literatürde olmayan özgün bir auxetic latis yapı tasarlanarak literatüre kazandırılmıştır.

Results (Bulgular): The greatest result in the design with sample number 12 was -0.2567 with a Poisson's ratio of 3.00 mm geometric inner thickness in a 4x4 matrix structure. / 12 numune nolu olan tasarımda 4x4 matrisli yapıda 3,00 mm geometrik iç kalınlıkta, poisson oranı -0,2567 olarak en yüksek sonuç bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): In this study, a unique unit cell, which is not available in the literature, was designed by using the drawing techniques of Islamic geometric patterns. According to the results of the analysis, the auxetic property of the designs increased as the geometric inner thickness increased. The analysis results of the designed lattice structures are compared with other structures in the literature. / Bu çalışmada islami geometric desenlerin çizim tekniklerini kullanarak literatürde bulunmayan özgün bir birim hücre tasarlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre geometrik iç kalınlık arttıkça tasarımların auxetilik özelliği artmıştır. Tasarlanan latis yapının analiz sonuçları literatürdeki diğer yapılarla kıyaslanmıştır.



Investigation of the Auxetic Behavior of an Original Lattice Structure Design

Nuriye Nur KAYA^{1,4*} , Cengiz ELDEM^{2*} , İhsan TOKTAŞ^{3*} 

¹ Department of Industrial Design Engineering, Gazi University, 06560 Ankara, Turkey

² Department of Industrial Design Engineering, Gazi University, 06560 Ankara, Turkey

³ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

⁴ Department of Industrial Product Design, Fırat University, 23300 Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 27/09/2023

Revision: 13/10/2023

Accepted: 14/10/2023

Keywords

Negative Poisson's Ratio
Auxetic Structure
Lattice Structures

Abstract

Auxetic structures are special structures with negative Poisson's ratio due to their geometric shapes. In these structures, transverse and longitudinal expansions are observed when tensile force is applied, while transverse and longitudinal contractions are observed when compressive force is applied. There are many different unit cell designs such as chiral, arrowhead, and re-entrant in auxetic structures. In this study, a new unique structure was designed, its structural and mechanical properties were investigated and it was aimed to contribute a new unique structure to the literature. A unique cell design is designed as a lattice structure and the behavior of the structure is investigated. All of the lattice structures were loaded at the same value, and the geometric internal thickness of the lattice structures was varied and the relationship between thickness and negative Poisson's ratio was investigated. Lattice structures designed with 12 different geometric inner thicknesses starting from 0,80 mm up to 3 mm with 0,20 mm increments and with 2×4 and 4×4 matrices were analyzed with a finite element analysis program and it was determined that all designs had negative Poisson's ratio. It was found that the structure with a 4×4 matrix and 3 mm geometric thickness exhibited the best auxetic behavior in the designed lattice structures.

Özgün Bir Latis Yapı Tasarımının Auxetic Davranışının İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/09/2023

Düzeltilme: 13/10/2023

Kabul: 14/10/2023

Anahtar Kelimeler

Negatif Poisson oranı
Auxetic yapılar
Kafes yapı

Öz

Auxetic yapılar, içyapılarında ki geometrik şekillerinden dolayı negatif Poisson oranına sahip özel yapılardır. Bu yapılar da çekme kuvveti uygulandığında enine ve boyuna genişlemeler izlenirken, basma kuvveti uygulandığında ise enine ve boyuna daralmalar gözlenmektedir. Auxetic yapılarda kiral, ok ucu, re-entrant gibi birçok farklı birim hücre tasarımları mevcuttur. Bu çalışma ile yeni bir özgün yapı tasarlanmış, bu yapının yapısal ve mekanik özellikleri irdelenmiş ve literatüre yeni özgün bir yapı kazandırmak amaçlanmıştır. Özgün bir hücre tasarımı, latis yapı olarak tasarlanmış ve yapının davranışı incelenmiştir. Latis yapıların hepsine aynı değerde yük uygulanmış olup, latis yapıların geometrik iç kalınlıkları değiştirilerek kalınlık ile negatif Poisson oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. 0,80 mm'den başlayarak 0,20 mm'lik artışlarla 3 mm'ye kadar 12 farklı geometrik iç kalınlıkta ve 2×4 ile 4×4 matrisli olarak tasarlanan latis yapıların analizleri sonlu elemanlar analiz programı ile gerçekleştirilmiş ve bütün tasarımların negatif Poisson oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Tasarlanan latis yapılarda 4×4 matrisli, 3 mm geometrik kalınlıktaki yapının en iyi auxetic'lik davranışı sergilediği bulunmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The behavior of auxetic structures is the opposite of that of conventional materials. When tensile force is given to these structures, they expand transversely, but contract transversely when compressive force is applied [1]. Due to their better energy absorption capacity [2], tensile strength [3], acoustic behavior [4], and fracture resistance [5]

these structures also possess superior properties. Because of these characteristics, they have been popular in industries such as automotive, aerospace, defense, and medicine [6].

In all auxetic structures, unit cell design is crucial [7]. The improvements made to the unit cell have improved the attributes of the constructions. Numerous 2D and 3D auxetic structures have been

created since the research of auxetic structures first began [8]. The most thoroughly researched auxetic structures have been honeycomb and re-entrant structures. Numerous improvements have been attempted to address the shortcomings of honeycomb and re-entrant structures, such as low stiffness and low strength [9,10]. The cell walls of the re-entrant structure were connected horizontally and vertically by Fu et al. [11], strengthening the structure. To increase the deformation points and crush strength of a single re-entrant unit cell, hybrid cell designs comprised of multiple cells have also been researched [9,12,13]. It has been successful in creating auxetic structures with hierarchical designs. The used cell structures' edges and walls are replaced with smaller ones in some places. Energy absorption and crush strength have greatly improved by optimizing the deformation points with these tiny substructures [14,15]. The equivalent elastic parameters of hierarchical tubes with negative Poisson's ratio under minor deformations were determined by Su et al. [16] using the Euler beam theory, and they created a new hierarchical tube with auxetic properties. Tan et al. [14] discovered that re-entrant cell structure improves the crushing force by creating cell walls with two different hierarchical patterns. Zhang et al [17], designed a new auxetic structure by combining the re-entrant cell structure with a new vertical strut investigated its mechanical behaviour, and found that the flexibility is better than the conventional re-entrant structure. Khan et al [18], similarly found that the modified form of the re-entrant structure and the negative Poisson's ratio increased compared to the conventional re-entrant structure.

Although elastic properties are usually evaluated in a linear range, plastic deformation, and cell extrusion in auxetic structures involve nonlinear behaviour [19–22]. While the majority of research is carried out statistically, the advent of additive manufacturing technologies has allowed for the efficient investigation of analytical models through experimental analysis [12,23].

In this study, a new original auxetic structure was designed and its structural and mechanical

properties were studied in order to introduce a new auxetic structure to the literature. An original lattice structure was constructed inspired by a pattern in an architectural work. Starting with the geometric inner thickness of 0,8 mm and 4×4 and 2×4 matrices, designs were realized up to 3 mm by increasing +0,2 mm, and finite element analyses were performed. AlSi10Mg material was preferred as the material in the analysis. The reason for choosing this material is that auxetic structures have become important in defence, aviation, and space studies in recent years. In these sectors, weight is a very important criterion, and lightness and strength properties direct researchers to aluminium alloys. According to the results of the analysis, the negative Poisson's ratio increased as the geometric inner thickness of the lattice structure increased.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. A Unit Geometry Design And Modelling

(Birim Geometri Tasarımı ve Modellenmesi)

The geometry of the unit cell was inspired by an architectural work and drawn with the grid method [24]. The aim of the design is to provide a unique auxetic structure in addition to the existing structures in the literature. Unit cell designs were realized in 2D with AutoCAD software (Figure 1). The designs drawn in 2D were converted into 3D solid models by assigning them to SOLIDWORKS drawing program. The mathematical model of the unit cell is shown in Figure 2. In the structure, K and β angle are fixed and a , b , c values are written in K . The value of x for the geometric internal thickness (t) is 0,2.

The designed unit cell was multiplied by mirroring method and 4×4 and 2×4 matrix structures were created. The unit cell was first mirrored by selecting the line in the vertical direction to mirror towards the right side. Then the mirrored parts were selected again and this time the line in the horizontal direction was selected to create a 1×1 matrix structure. In this way, necessary duplications were made with this method and matrices were obtained in desired quantities (Figure 3).

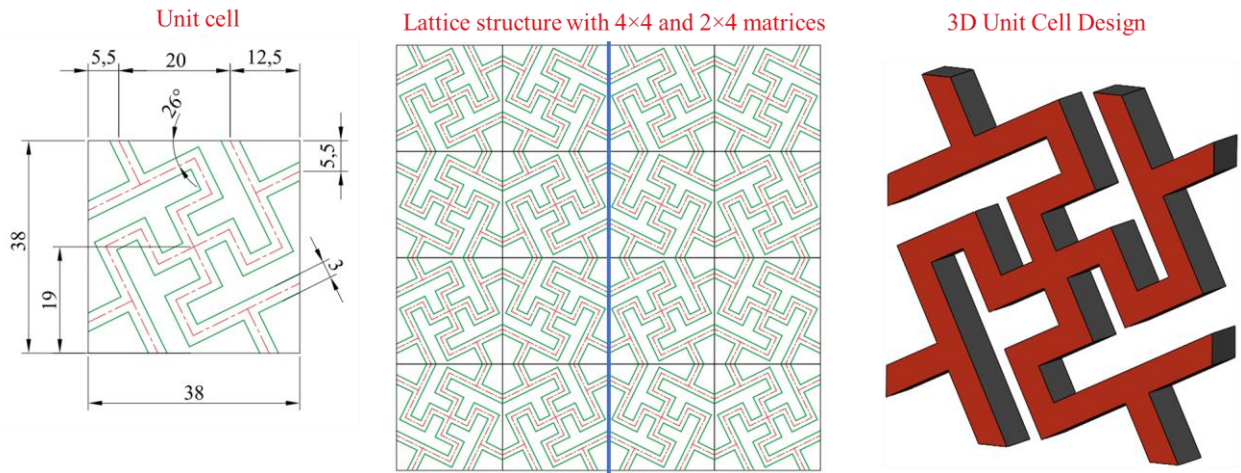


Figure 1. Formation of lattice structures using unit cells (Birim hücre ile latis yapı oluşumu)

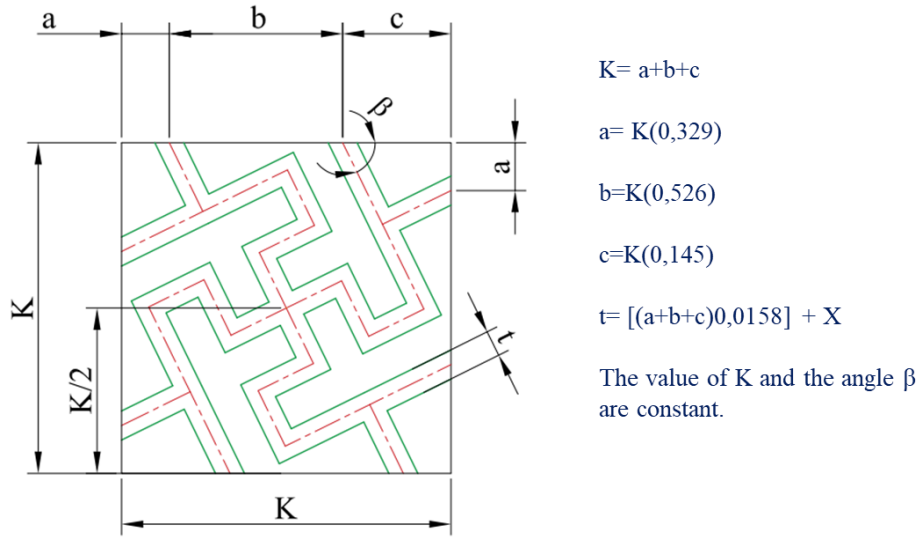


Figure 2. Mathematical model of the unit cell (Birim hücrenin matematiksel modeli)

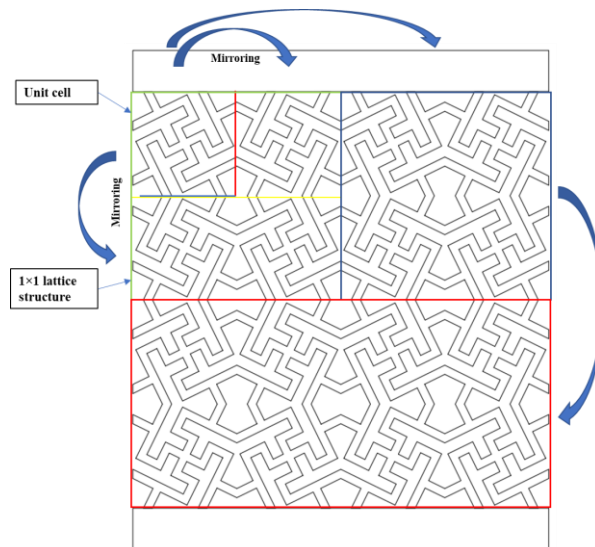


Figure 3. Modeling process of matrix structure (Matrisli yapının modellenme süreci)

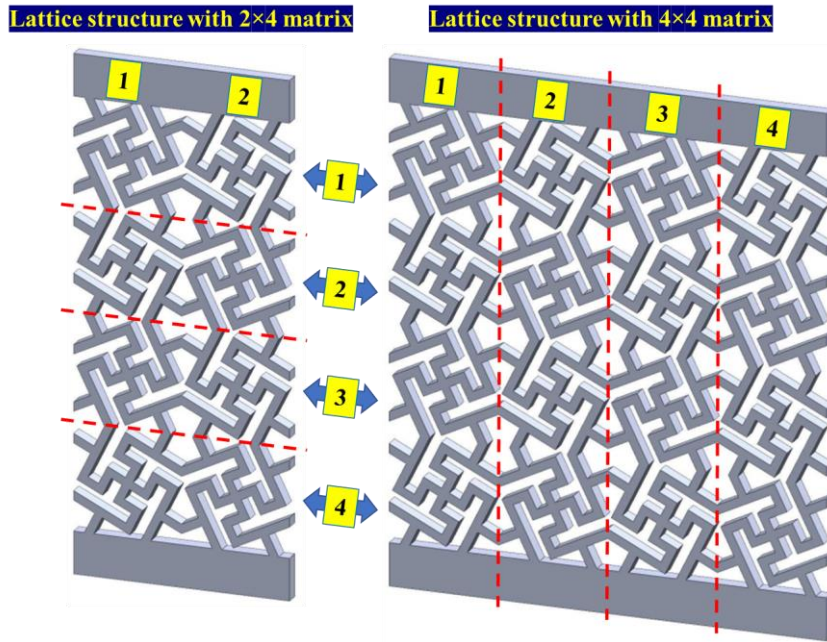


Figure 4. Lattice structures in matrix form (Latis yapıların matris şekilleri)

The purpose of replication with the mirroring method is to create successive unit cells. The fact that the matrices are different is another parameter to examine the relationship with Poisson's ratio in addition to the geometric internal thickness parameter (Figure 4).

2.2. Poisson's Ratio Calculation (Poisson Oranı Hesaplaması)

Poisson's ratio is the ratio of transverse stress to axial strain and its sign is negative. However, this negativity comes from the formula and in conventional materials, there is a vertical increase in the direction of the tensile force, while a contraction occurs in the horizontal direction [25]. The positive Poisson's ratio is obtained because ϵ_x has a (-) sign due to the contraction here and two negative signs come together and become positive. Negative Poisson's ratio is the opposite of this situation. When an auxetic structure is subjected to a tensile force, there is an increase in the vertical direction and an expansion in the horizontal direction. In this case, the Poisson's ratio is negative with ϵ_x (+) sign. Poisson's ratio was calculated by using equations 1, 2, 3, 4 in the designs. Using equations 1, 2, 3, 4 in the designs.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}, \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}}, \quad (2)$$

$$L_{x1} = L_{x0} + L_{xL} + L_{xR} \quad (3)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}}, \quad (4)$$

Here, ν : Poisson ratio, ϵ_x : expansion in X direction, ϵ_y : elongation in Y direction, ΔL_x : total shape change in X direction, ΔL_y : total shape change in Y direction, L_0 : initial length, L_1 : final length. Figure 5 details the method of obtaining L_{x1} .

2.3. Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)

Finite element analysis was used to determine whether the new lattice structure has a negative Poisson's ratio. ANSYS 17.0 analysis program was used to analyze the designs saved in ".x.t" format from SOLIDWORKS design program. AlSi10Mg aluminum alloy was assigned as the material in all designs (Table 1). In total, 24 different analyses were performed. A mesh with an element size of 0,75 mm was applied to the lattice structures created using the body sizing module for finite element analysis.

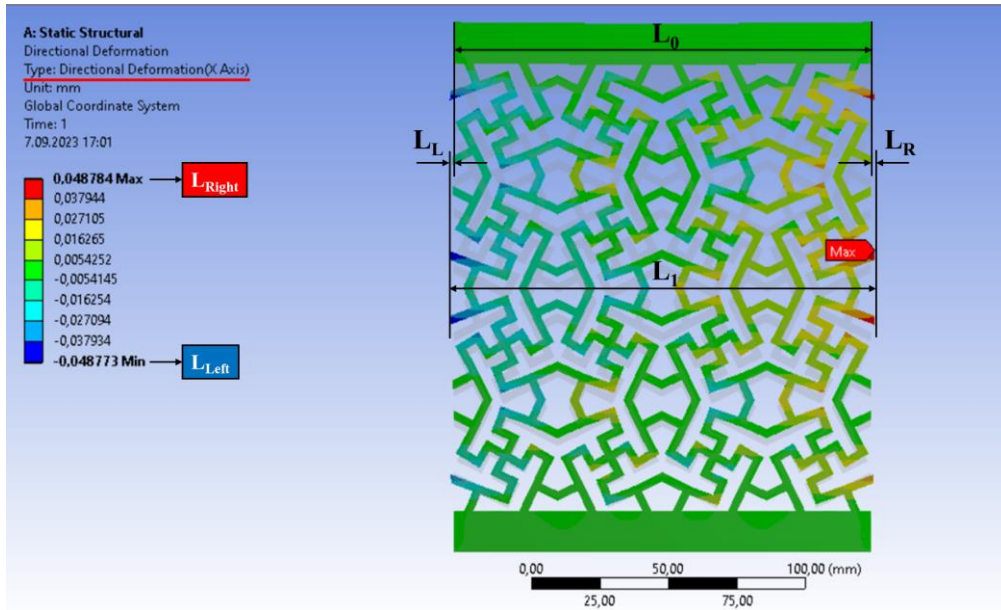


Figure 5. Schematic illustration of the ΔL_x formula (ΔL_x formülünün şematik gösterimi)

Table 1. Mechanical properties of AlSi10Mg aluminum alloy (AlSi10Mg alüminyum alaşımının mekanik özellikleri)

	Density (g/cm ³)	Poisson's ratio	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)
AlSi10Mg	2,67 g/cm ³	0,33	440	240	70

2.3.1. Boundary Conditions in Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizinde Sınır Koşulları)

The boundary conditions of the design were created in order to do the analysis of the lattice structures (Figure 6). A pressure of -0,5 MPa was applied in the direction of the “Y” axis while the design was fastened at the bottom. Analysis was conducted without taking into account the lattice structure's

weight. The shape changes in the “X” direction and the shape changes in the “Y” direction were studied to ascertain the Poisson's ratio of the designs (Figure 7). The link between the von Mises stress and total displacements with Poisson's ratio for the designed structures was also examined (Figure 8), in addition to the form changes of the designs.

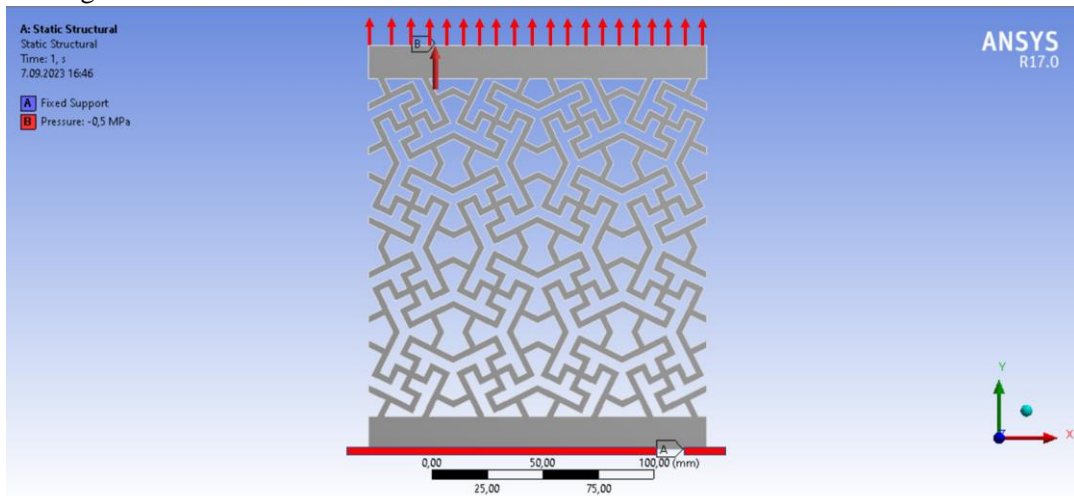


Figure 6. Boundary conditions of the lattice structure (Latis yapının sınır şartları)

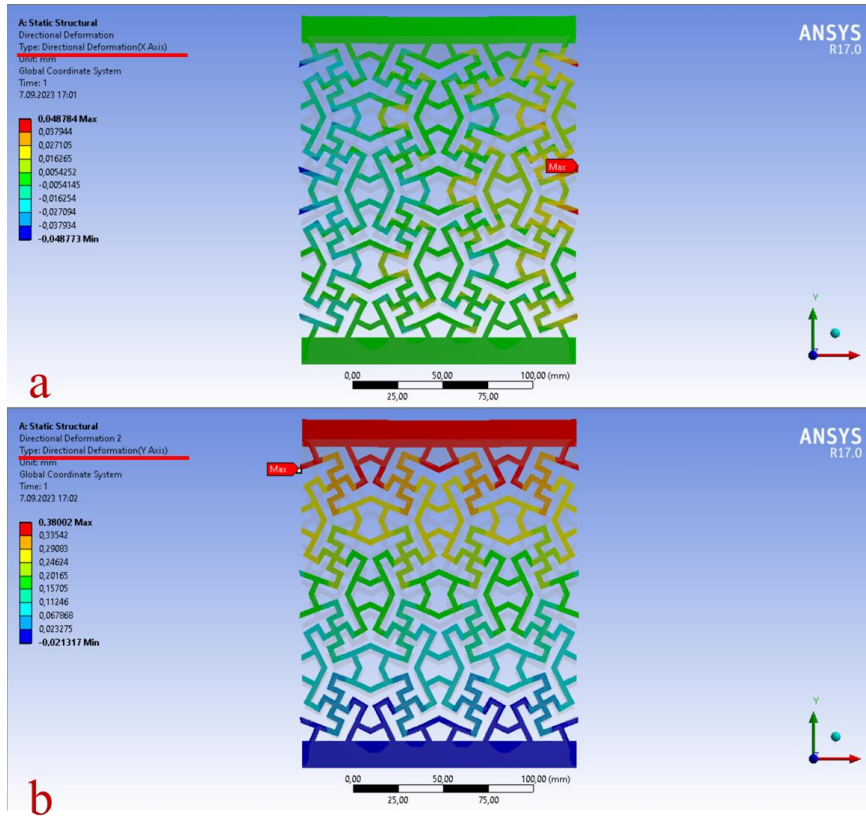


Figure 7. Shape change in X direction (a) and shape change in Y direction (b) (X yönündeki şekil değişimi (a) ve Y yönündeki şekil değişimi (b))

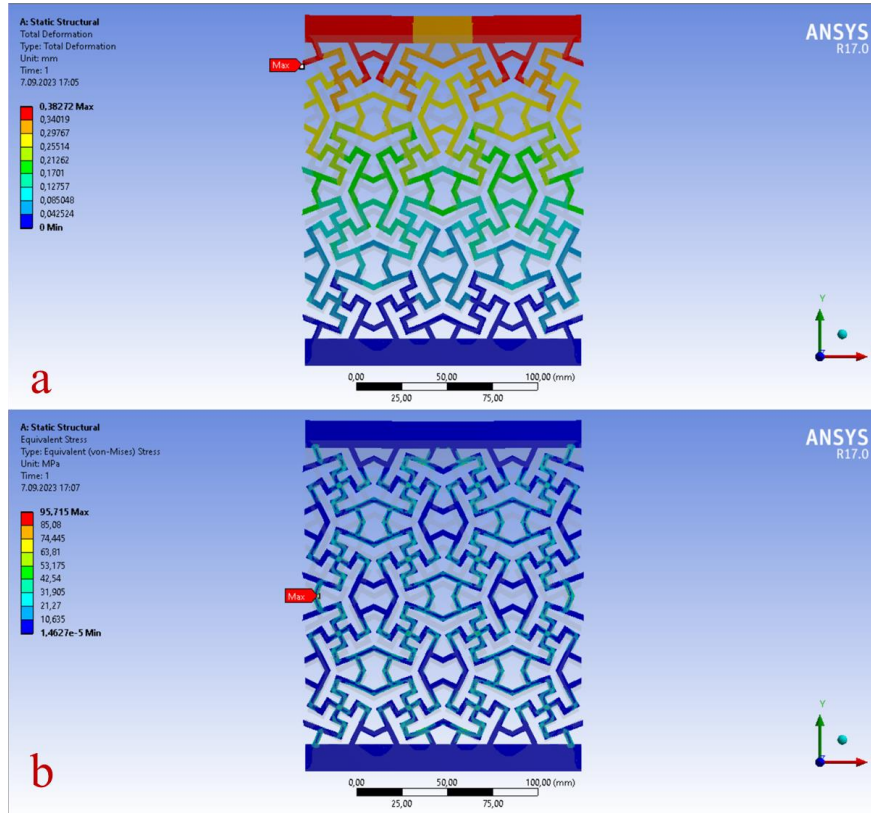


Figure 8. Total deformation (a), von Mises stress (b) ((Toplam deformasyon (a), von mises gerilimi (b))

3. RESULTS and DISCUSSION (Sonuçlar ve Tartışma)

The relationship between the geometric internal thickness and Poisson's ratio of the designed lattice structure is analyzed. A total of 24 different structures of 2x4 matrix and 4x4 matrix structures with 12 different geometric internal thickness variables were analyzed. The same value of shrinkage was applied to each of the designs. The shape changes, total deformation and von Mises stresses of the lattice structures in the x and y-axis directions were analyzed. Poisson's ratio was calculated with equations (1), (2) and (3).

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{0,0976}{152} = 0,00064 \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{0,3800}{152} = 0,00250 \quad (3)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{0,00064}{0,00250} \quad (1)$$

ν : Poisson's ratio = -0,2567

The Poisson's ratio of design number 12 with 3 mm geometric internal thickness was found to be -0,2567. Similar Poisson's ratio was calculated for

the other lattice structures. Poisson's ratio, total deformation and von Mises stress of 4x4 and 2x4 matrix structures with geometric internal thicknesses are given in Table 2.

The relationship between the geometric internal thickness and the poisson ratio for 2x4 and 4x4 matrix structures is shown in Figure 9. As can be seen from the graph with the tensile force applied to the structures, it is observed that the poisson ratio of the lattice structure approaches -0,5 as the geometric inner thickness increases in the 4x4 matrix structure. As in the study by Erdoğan and Toktaş, the poisson ratio increased as the thickness increased [27]. In addition, auxetic structures exhibit different behavior due to their geometry. In the study of Zhang et al [28], according to the analysis and experimental results of the re-entrant chiral structure, it was found that the Poisson ratio value changed during deformation in the direction of the unidirectional applied force and showed auxetic properties in the negative direction almost up to -4.

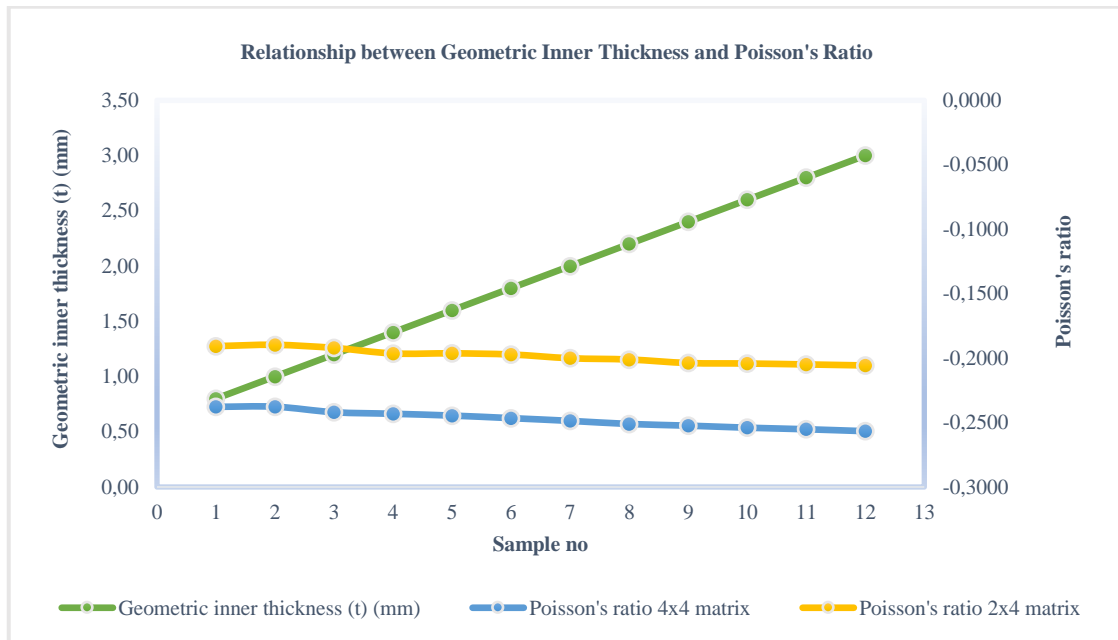


Figure 9. Relationship between geometric inner thickness and poisson's ratio (Geometrik iç kalınlık ile Poisson oranı ilişkisi)

Table 2. Von Mises stress and total deformation results with Poisson's ratio variation (Poisson oranı değişimi ile Von Mises gerilme ve toplam deformasyon sonuçları)

Sample No	Geometric inner thickness (mm)	Poisson's ratio 4x4 matrix	Poisson's ratio 2x4 matrix	von Mises stress 4x4 matrix	von Mises stress 2x4 matrix	Total deformation 4x4 matrix	Total deformation 2x4 matrix
1	0,80	-0,2378	-0,1907	1004,4	880,34	19,6040	21,3910
2	1,00	-0,2377	-0,1897	680,85	744,34	10,1480	11,3300
3	1,20	-0,2420	-0,1921	443,51	512,37	5,8825	6,5707
4	1,40	-0,2432	-0,1964	345,09	372,26	3,6982	4,1175
5	1,60	-0,2446	-0,1963	260,47	280,52	2,4754	2,7479
6	1,80	-0,2466	-0,1972	252,37	270,98	1,7520	1,9379
7	2,00	-0,2487	-0,2001	203,77	219,34	1,2769	1,4079
8	2,20	-0,2511	-0,2011	163,32	179,65	0,9609	1,0532
9	2,40	-0,2524	-0,2038	154,88	164,02	0,7412	0,8088
10	2,60	-0,2540	-0,2042	137,95	119,14	0,5861	0,6365
11	2,80	-0,2552	-0,2049	112,19	120,07	0,4701	0,5076
12	3,00	-0,2567	-0,2057	95,715	102,35	0,3827	0,4110

The relationship between von Mises stress and Poisson's ratio is given in Figure 10. Since lattice structures can undergo plastic deformation, von Mises stress values are very important for these structures. The aim here is to ensure that the structure is not subjected to stress above its capacity and fulfills its function. In this case, the relationship between the highest von mises stress and Poisson's ratio of the lattice structure sample no 1 with a Poisson's ratio of -0,23 is given in Figure 11.

In the study of Potheir et al. the von mises stress increased as the thickness of the unit cell increased [29]. The main reason for the two different results is due to the different geometrical structures of the unit cells. For example, it has been found that such structures have higher tensile strength and tensile strength due to the more uniform von mises stress distribution under tensile load in re-entrant structures [30].

As seen in the graph, it was observed that the maximum von mises stress of the structures decreased as the Poisson's ratio increased inversely.

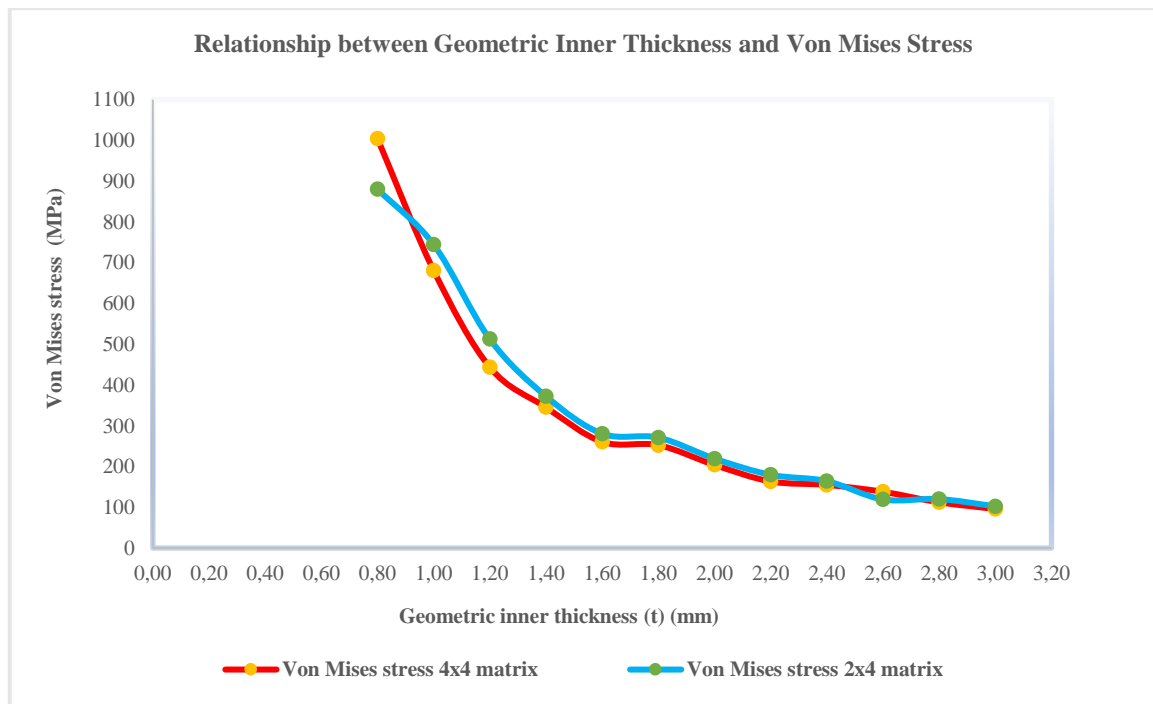


Figure 10. Relationship between geometric inner thickness and von mises stress (Geometrik iç kalınlık ile Von mises gerilimi ilişkisi)

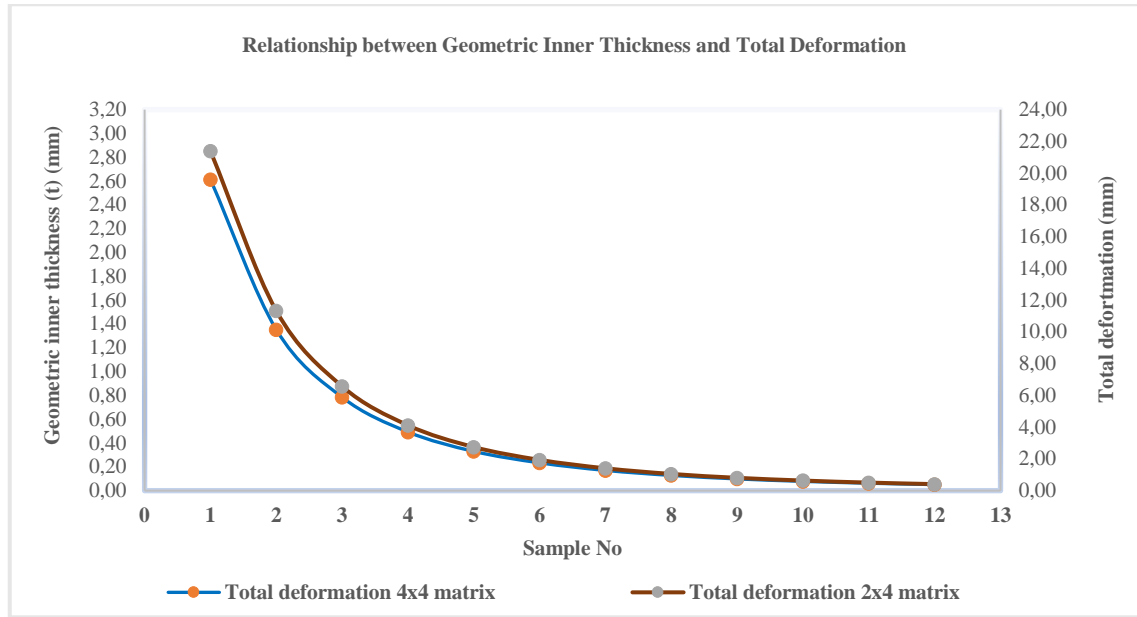


Figure 11. Relationship between geometric inner thickness and total deformation (Geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi)

It is observed that the total displacement decreases as the Poisson's ratio increases (Figure 11). As in the unit cell design by Zhang et al., high displacement was observed at low Poisson's ratio since transverse longitudinal elongations were higher at low thicknesses due to the flexibility of the structure. As the thickness of the structure increases, the total amount of displacement decreases due to the decrease in flexibility [17].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The Poisson's ratio of the lattice structure, which was designed inspired by the architectural pattern, was investigated by the finite element analysis method. The effects on Poisson's ratio of lattice structures by changing the number of matrices and geometric internal thickness dimensions were analyzed. In auxetic structure designs, special attention should be paid to issues such as geometric inner thickness and force direction of unit cell structures. The results found in the study are given below;

- All of the 24 lattice structures designed have negative Poisson's ratio.
- As the geometric inner thickness increased, the Poisson's ratio increased due to the geometry of the designed lattice structure.
- The lattice structure with 4×4 matrix shows more auxetic properties than the structure with 2×4 matrix

- In the 4×4 matrix structure, the highest Poisson's ratio was found in the sample with a geometric inner thickness of 3 mm
- In 2×4 and 4×4 matrix lattice structures, as the geometric inner thickness increased, the von Mises stress decreased due to the special geometric structure of the unit cell.
- In 2×4 and 4×4 matrix structures, as the geometric inner thickness increased, the total displacement decreased accordingly due to the decrease in elasticity.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜRLER)

This study was supported by Gazi University Scientific Research Projects (BAP) unit with the project numbered FDK-2022-8066.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Nuriye Nur KAYA: He has done modeling, analysis processes and article writing processes.

Cengiz ELDEM: He has contributed subject and article evaluation.

İhsan TOKTAŞ: He has contributed subject and article evaluation.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

NOMENCLATURE (KISALTMA)



2D	Two dimensional
3D	Three dimensional
ε	Strain
t	Geometry inner thickness
ν	Poisson's ratio

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Prog Mater Sci.* 94 (2018) 114–173.
- [2] M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang, H. Lei, Y. Bai, D. Fang, Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies, *Int J Mech Sci.* 159 (2019) 43-57.
- [3] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Prog Mater Sci.* 46 (2001) 559–632.
- [4] K.E. Evans, A. Alderson, Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!, *Advanced Materials.* 12 (2000) 617–628.
- [5] C. Huang, L. Chen, Negative Poisson's Ratio in Modern Functional Materials, *Advanced Materials.* 28 (2016) 8079–8096.
- [6] A. Alderson, K.L. Alderson, Auxetic materials, *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng.* 221 (2007) 565–575.
- [7] R. Gatt, L. Mizzi, J.I. Azzopardi, K.M. Azzopardi, D. Attard, A. Casha, J. Briffa, J.N. Grima, Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials, *Sci Rep.* 5 (2015) 8395.
- [8] C. Qi, F. Jiang, A. Remennikov, L.-Z. Pei, J. Liu, J.-S. Wang, X.-W. Liao, S. Yang, Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs, *Compos B Eng.* 197 (2020) 108117.
- [9] L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier, Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *Int J Solids Struct.* 69–70 (2015) 475–490.
- [10] C. Qi, F. Jiang, S. Yang, A. Remennikov, Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing, *Thin-Walled Structures.* 169 (2021) 108314.
- [11] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Compos Struct.* 175 (2017) 101–110.
- [12] K.P. Logakannan, V. Ramachandran, J. Rengaswamy, Z. Gao, D. Ruan, Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure, *Compos Struct.* 254 (2020) 112853.
- [13] M. Xu, D. Liu, P. Wang, Z. Zhang, H. Jia, H. Lei, D. Fang, In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies, *Aerosp Sci Technol.* 106 (2020) 106081.
- [14] H.L. Tan, Z.C. He, K.X. Li, E. Li, A.G. Cheng, B. Xu, In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio, *Compos Struct.* 229 (2019) 111415.
- [15] Y. Chen, T. Li, Z. Jia, F. Scarpa, C.-W. Yao, L. Wang, 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations, *Mater Des.* 137(2018)226–234.
- [16] Y. Sun, N. Pugno, Hierarchical Fibers with a Negative Poisson's Ratio for Tougher Composites, *Materials.* 6 (2013) 699–712.
- [17] X. Zhang, R. Tian, Z. Zhang, G. Li, W. Feng, In-plane elasticity of a novel vertical strut combined re-entrant honeycomb structure with negative Poisson's ratio, *Thin-Walled Structures.* 163 (2021) 107634.
- [18] S.Z. Khan, F. Mustahsan, E.R.I. Mahmoud, S.H. Masood, A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetic behavior: Analytical and numerical study by FEA, *Mater Today Proc.* 39 (2021) 1041–1045.
- [19] A. Ingrole, A. Hao, R. Liang, Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Mater Des.* 117 (2017) 72–83.
- [20] L. Wei, X. Zhao, Q. Yu, G. Zhu, A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength, *Thin-Walled Structures.* 149 (2020) 106623.

- [21] M. Xu, D. Liu, P. Wang, Z. Zhang, H. Jia, H. Lei, D. Fang, In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies, *Aerosp Sci Technol.* 106 (2020) 106081.
- [22] H. Wang, Z. Lu, Z. Yang, X. Li, A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance, *Compos Struct.* 208 (2019) 758–770.
- [23] X. Zhang, H. Hao, R. Tian, Q. Xue, H. Guan, X. Yang, Quasi-static compression and dynamic crushing behaviors of novel hybrid re-entrant auxetic metamaterials with enhanced energy-absorption, *Compos Struct.* 288 (2022) 115399.
- [24] Jay Bonner, *Islamic geometric patterns*, New York, USA, 1999.
- [25] M. Lei, W. Hong, Z. Zhao, C. Hamel, M. Chen, H. Lu, H.J. Qi, 3D Printing of Auxetic Metamaterials with Digitally Reprogrammable Shape, *ACS Appl Mater Interfaces.* 11 (2019) 22768–22776..
- [26] İ. Erdoğan, İ. Toktas, Geometri İç Kalınlığının Yeni Tasarlanan Ökzetik Yapı Üzerine Etkisinin Araştırılması, *Journal of Polytechnic.*(2022).
- [27] S. Pothier, R. Roufail, M. Malton, Unit Cell Modelling of Auxetic Structure, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering.* 10 (2022) 360–369.
- [28] J. Zhang, G. Lu, Z. Wang, D. Ruan, A. Alomarah, Y. Durandet, Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis, *Compos Struct.* 184 (2018) 92–101.
- [29] S. Pothier, R. Roufail, M. Malton, Unit Cell Modelling of Auxetic Structure, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering.* 10 (2022) 360–369.
- [30] Y. Yao, L. Wang, J. Li, S. Tian, M. Zhang, Y. Fan, A novel auxetic structure based bone screw design: Tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation, *Mater Des.* 188 (2020) 108424.

Şerit Yoğunluk Tespit ve Bilgilendirme Sistemlerinin Tasarımdan İşletmeye Genel Altyapısının Belirlenmesi: Örnek bir Sistem Tasarımı

Metin Mutlu AYDIN^{1*}  Başak BIYIK² 

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

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Akıllı Sistemler Mühendisliği, Samsun, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/03/2023
Düzeltilme: 18/08/2023
Kabul: 29/09/2023

Anahtar Kelimeler

Trafik yoğunluğu
Akıllı ulaşım
Akıllı sistemler
Şerit yoğunluk tespiti
Şerit kullanımı

Article Info

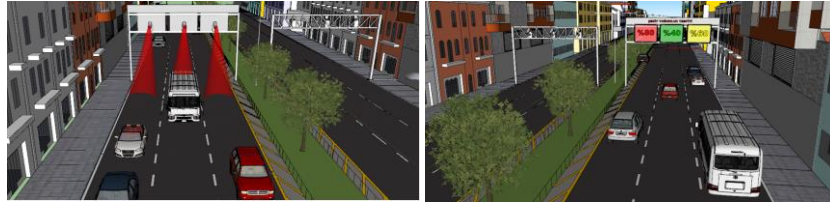
Research article
Received: 29/03/2023
Revision: 18/08/2023
Accepted: 29/09/2023

Keywords

Traffic density
Intelligent transportation
Intelligent systems
Lane density detection
Lane utilization

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada şehir içi yollardaki şerit yoğunluklarının tespit edilmesi ve işletilmesi detaylı olarak araştırılmıştır. / In this study, the determination and operation for lane densities on urban roads were investigated in detail.



Şekil A: Şerit kullanım yoğunluklarının tespit edilmesi / Figure A: Determination of lane utilization densities.

Önemli noktalar (Highlights)

- Akıllı sistemler kullanılarak bir trafik sorununa çözüm yöntemi önerilmiştir. / A solution method to a traffic problem has been proposed using intelligent systems.
- Önerilen sistem SketchUp® ile modellenerek örneklendirilmiştir. / The proposed system is modeled and illustrated with SketchUp®
- A'WOT tekniği kullanılarak önerilen sistem değerlendirilmiştir. / The proposed system was evaluated using the A'WOT technique

Amaç (Aim): Sürücülerin yol boyunca şeritlerdeki trafik yoğunluğu oranlarını görerek yoğunluğu daha az olan şeritlere yönelmelerinin sağlanması ile trafik yoğunluğunun azaltılması amaçlanmaktadır. / The aim is to reduce traffic congestion by enabling drivers to see the traffic density ratios in the lanes along the road and direct them to less congested lanes.

Özgünlük (Originality): Trafik yoğunluğunu azaltmak amacıyla akıllı sistemler kullanılarak yapılan uygulamalardan farklı olarak önerilen sistem sürücülere anlık olarak şerit yoğunluğunu göstererek sürücülerini yoğunluğun az olduğu şeritten ilerlemeye teşvik etmektedir. / Unlike the applications using smart systems to reduce traffic congestion, the proposed system instantly shows the lane density to the drivers and encourages them to move from the less congested lane.

Bulgular (Results): Önerilen sistemin A'WOT tekniği kullanılarak uzmanlar tarafından değerlendirilmesi sonucunda sistemin en güçlü yönünün amacına uygun olarak %37,1 ile G2 faktörü olduğu görülmüştür. En zayıf yönünün ise %45,3 ile Z5 faktörü olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra %50,2 ile "F2" faktörü sistem için en önemli fırsat olarak değerlendirilirken %71,4 ile T3 faktörü sistem için en yüksek orana sahip tehdit faktörü olarak belirlenmiştir. / As a result of the evaluation of the proposed system by experts using the A'WOT technique, it was seen that the strongest aspect of the system was the G2 factor with 37.1% in accordance with its purpose. The weakest aspect of the system is Z5 factor with 45.3%. In addition, the "F2" factor with 50.2% is considered as the most important opportunity for the system, while the T3 factor with 71.4% is determined as the threat factor with the highest rate for the system.

Sonuç (Conclusion): Giderek artan trafik yoğunluğunun azaltılması için girişimlerde bulunulmasının elzem bir hale gelmesi ve gelişen teknoloji ile birlikte akıllı sistemlerin bu tür sorunların çözümlerinde kullanımının yaygınlaşması önerilen sistemin uygulanabilirliği için bir avantaj olarak görülmektedir. Gelecek çalışmalarda sistemin test edilmesi için uygun bölgeler belirlenmeli ve elde edilecek sonuçlar doğrultusunda gerekli iyileştirmeler yapılarak bu tür bir uygulamanın ülkemizde ilk defa hayata geçirilmiş olacaktır. / The fact that it has become essential to take initiatives to reduce the increasing traffic density and the widespread use of smart systems in solving such problems with the developing technology is seen as an advantage for the applicability of the proposed system. In future studies, suitable regions should be determined for testing the system and necessary improvements should be made in line with the results to be obtained and such an application will be realized for the first time in our country.



Şerit Yoğunluk Tespit ve Bilgilendirme Sistemlerinin Tasarımdan İşletmeye Genel Altyapısının Belirlenmesi: Örnek bir Sistem Tasarımı

Metin Mutlu AYDIN^{1*} Başak BIYIK²

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

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Akıllı Sistemler Mühendisliği, Samsun, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/03/2023
Düzeltilme: 18/08/2023
Kabul: 29/09/2023

Anahtar Kelimeler

Trafik yoğunluğu
Akıllı ulaşım
Akıllı sistemler
Şerit yoğunluk tespiti
Şerit kullanımı

Öz

Dünya'da ve Türkiye'de trafığe çıkan araç sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum doğal olarak trafikte oluşan araç yoğunluğunun giderek artmasına ve yolculuklarda önemli gecikmelere sebebiyet verebilmektedir. Birçok insanın günlük hayatını etkileyen bu sorun, özellikle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu şehirlerde kendini daha net göstermektedir. Şehir içi trafikte oluşan yoğunluğun çeşitli sebeplerinin olmasının yanı sıra, trafikte araç sürücülerinin şerit seçim ve kullanım tercihleri de oluşan yoğunluk üzerinde önemli olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Sürücülerin yollarda en sol şerit daha hızlı hareket eder düşüncesi ile o şeridi daha çok kullanma arzusu içerisinde olması, tek bir şeritte yığılma oluşmasına neden olabilmektedir. Çalışmada, Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) yardımıyla çok şeritli şehir içi yollarda şerit kullanım yoğunluklarının tespitinin yapılmasını amaçlayan yenilikçi bir akıllı sistem öneri tasarımı sunulmuştur. Önerilen bu yeni sistem üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesi amacıyla bir SWOT analizi yapılmıştır. SWOT analizi ile belirlenen faktörler, beş kişilik bir uzman ekibin değerlendirmeleri ile analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Sonrasında uygulanan A'WOT analizinden elde edilen sonuçlara göre, sistemin en güçlü yönünün önerilen bu sistemin çıktısı olarak beklenen doğru şerit kullanımı ile trafikte tıkanıklığın azaltılması olduğu görülmüştür. Önerilen sistemin ana hedefi olan bu faktörün ön plana çıkması, çalışmanın temel amacını desteklemiş ve bu tür yenilikçi sistemlere ihtiyaç olduğunu net şekilde ortaya koymuştur.

Determining the General Infrastructure of Lane Density Detection and Information Systems from Design to Operation: An Example System Design

Article Info

Research article
Received: 29/03/2023
Revision: 18/08/2023
Accepted: 29/09/2023

Keywords

Traffic density
Intelligent transportation
Intelligent systems
Lane density detection
Lane utilization

Abstract

The number of vehicles on the road in the world and in Turkey is increasing day by day. This situation naturally may cause an increase on the density of vehicles in traffic and may cause significant delays in journeys. This problem, which affects the daily life of many people, shows itself more clearly, in cities with a high population density. In addition to the various reasons for the density in urban traffic, the lane choice and utilization preferences of vehicle drivers in traffic can also have a significant negative effect on the density. The fact that the drivers want to use that lane more with the thought that the leftmost lane moves faster on the roads can cause congestion in a single lane. In the study, an Intelligent Transportation Systems (ITS) proposal design which aims to determine the lane usage densities on multi-lane urban roads with the help of intelligent transportation systems is presented. A SWOT analysis was conducted to determine the factors which affecting the proposed the new system. The determined factors via a SWOT analysis were weighted using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method with the evaluations of a team of five experts. According to the obtained results from the A'WOT analysis, it has been seen that the strongest aspect of the system is the reduction of traffic congestion with the correct lane usage expected as the output of this proposed system. The prominence of this factor, which is the main goal of the proposed system, supported the main purpose of the study and clearly demonstrated the need for such innovative systems in urban roads.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kent yöneticileri ve ulaşım planlamacıları, artan trafik yoğunluğunun önüne geçebilmek için yeni yollar inşa ederek ve ulaşım yatırımları yaparak çözüm aramaktadır [1]. Fakat, bu durum hem uzun zaman gerektirmekte hem de yüksek maliyeti beraberinde getirmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte gerek maliyet gerekse etkin performansı nedeniyle, akıllı sistem uygulamaları birçok alanda olduğu gibi ulaşım problemlerinin çözümünde de sıklıkla tercih edilmektedir [2]. Bu ulaşım problemlerinin birisi de yollardaki trafik yoğunluğu sorunudur. Gün geçtikçe artan nüfusa bağlı olarak trafiğe çıkan araç sayısı da giderek artış göstermektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından son yayınlanan rapordan elde edilen verilere göre son bir yılda Türkiye’de trafiğe çıkan araç sayısı %111,2 oranında artış göstermiştir [3]. Bu artış ne yazık ki özellikle ana arterlerde oluşan araç trafiğinin artmasına sebebiyet vermekte ve artan bu trafik, trafik kazalarının meydana gelme olasılığını da artırmaktadır. Trafik kazalarının meydana gelmesinde etkili olan çeşitli faktörler bulunmasına karşın, elde edilen istatistiksel sonuçlara göre kazaların büyük bir çoğunluğunun sürücü kaynaklı meydana gelen kazalardan oluştuğu görülmektedir. [4,5]. Trafikte geçirilen sürenin artmasının sürücüler üzerinde yarattığı stres, öfke, dikkat dağınıklığı gibi faktörler sürücü kaynaklı kaza oranlarındaki yüksekliği açıklar niteliktedir. Bunun yanı sıra yoğun trafik fazla yakıt tüketimi, artan gaz emisyonu, hava kirliliği, gürültü kirliliği gibi çevresel olumsuzlukları da tetiklemektedir. Yapılan araştırmalardan, ulaşım faaliyetleri nedeniyle tüketilen yakıtlardan açığa çıkan emisyon miktarı küresel sera gazlarının yaklaşık olarak %20’sini oluşturmaktadır. Ulaşım türlerinden karayolu ulaşımı ise bu oranın %70’ini oluşturmaktadır [6]. Tüm bu sebepler göz önüne alındığında trafik yoğunluğu sorununun çözülmesi gereken bir problem olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

Dünya’da ve ülkemizde halihazırda sürücülere şeritteki yoğunluk ya da özel durum konusunda sadece şeridin kapalı ya da yoğun olduğu şeklinde uyarı yapan dijital sistemler mevcuttur. Bu sistemler şeritte kaza vb. durumdan kaynaklı bir kapanma ya da yoğun trafik akımından dolayı bir tıkanma var ise genel bir uyarı yaparak sürücülere bu şeridi kullanmamaları ve diğer şeritlere yönlendirme konusunda bilgilendirmektedir. Günümüzde özellikle batılı ülkelerde, sürücülerin daha hızlı gitme arzusu ile tek bir şeridi tercih etme durumları bu ülkelerdeki geometrik yol düzenlemeleri, sürücü kültürü, cezai yaptırımlar vb. nedenlerle ne yazık ki

pek sık rastlanılan bir durum değildir. Ne yazık ki agresif sürücü profiline sahip ve ehliyet aşamasında sürücü eğitiminin oldukça zayıf olduğu ülkemizde sürücüler çok şeritli ana arterleri kullanarak bir yerlere yetişmeye arzusu içerisinde zamandan tasarruf etmek adına genellikle hızlı akan şerit olarak düşünülen sol şeriti tercih etmektedirler. Bu genel olumsuz durum nedeniyle sol şerit durma noktasına gelirken orta ve sağ şeritten trafik akışının daha hızlı devam ettiği durumlar meydana gelebilmektedir. Aynı zamanda sol şeritte seyir halindeyken sinyalizasyon kavşaklarda, ışığın yeşilden kırmızıya döndüğü anda uzun kuyruklar yaşanırken diğer şeritlerde kuyruğun daha az olması nedeniyle kuyruğun daha hızlı boşaldığı gözlemlenebilmektedir. Bu olumsuz durum ülkemizde bu sorunun çözümüne katkı sağlayabilecek yeni sistem ve sistemlerin geliştirilmesini elzem kılmaktadır.

Bu nedenle bu çalışmada iki veya daha fazla şeride sahip ana arterlerde şerit yoğunluğunun tespiti ile şeritlerin kontrollü kullanılarak, hatalı şerit kullanımından kaynaklanan trafik yoğunluğunu bir miktar azaltabilecek yeni bir şerit yoğunluk tespit ve bilgilendirme sistemi önerilmiştir. Bu yeni sistem mevcut sistemlerde olduğu gibi sadece şerit kapalı ya da yoğun bilgisi yerine yapılacak sayımlar ile şeritlerin tam olarak yoğunluk oranını vererek sürücülerin şeritlere eşit şekilde dağılmalarını sağlayabilecektir. Bu kapsamda belirli aralıklarla konumlandırılan dijital mesaj sistemleri yardımıyla trafik yoğunluğunun az olduğu şeritten ilerlemesi ve bu sayede her bir şeridin eşit oranda kullanımı sağlanarak; tek bir şeritte oluşabilecek yoğunluğun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır Genel olarak çalışmanın ana motivasyonu, Türkiye vb. şerit seçim ve kullanım disiplininin zayıf olduğu ülkelerde dijital sistemlerden yararlanarak, sürücülerin en efektif şerit seçimi yapmaları konusunda onları yönlendirmek ve böylece kapasite kullanımında artış sağlayabilmektedir. Çalışma ile hızlı gidebilmek amacıyla hep sol şeridi kullanan sürücülerin neden olduğu kapasite kaybını azaltarak, akımın şeritler arasında eşit dağılımını sağlayarak kapasiteyi arttırabilmek hedeflenmektedir.

Önerilen bu sistem üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesi amacıyla SWOT (Güçlü yönler, Zayıf yönler, Fırsatlar, Tehditler) analizi yapılmıştır. Bu analiz ile belirlenen tüm faktörler uzman değerlendirmeleri sonuçlarının analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Analitik Hiyerarşi Prosesi ve SWOT analizinin entegrasyonunu barındıran A’WOT tekniği elde edilen sonuçlara göre sistemin

en güçlü yönünün önerilen bu sistemden arzulanan doğru şerit kullanımı ile trafikte tıkanıklığın azaltılması olduğu görülmüştür. Çalışma ile önerilen sistemin çıkış noktası olan bu faktörün ön planda olması, çalışmanın temel amacını desteklemiş ve bu tür yenilikçi sistemlere ihtiyaç olduğunu net şekilde ortaya koymuştur.

Mevcut çalışma, bir sonraki bölümde önerilen sisteme benzer çalışmaları incelemektedir. Üç numaralı bölümde ise sistemin tasarım özelliklerini detaylı olarak adım adım anlatmakta ve işletmenin nasıl olacağını paylaşmaktadır. Sonraki bölümde ise A'WOT analizi ile sistemin önceliklerinin neler olduğunu araştırmakta ve bu öncelikler dikkate alınarak tasarımının yapılması gerektiğini açıklamaktadır. En son bölüm olan "Sonuç ve Öneriler" bölümünde ise bu ve benzeri sistemlerin uygulanması ile birlikte elde edilmesi beklenen muhtemel kazanımlar belirtilerek; efektif bir performans için nelere dikkat edilmesi gerektiğine dikkat çekilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Mevcut yol kapasitesinin artan araç sayısı nedeniyle yetersiz kalmaya başlaması trafikteki sıkışıklığın giderek artmasına neden olmaktadır [7,8]. Bu artış günümüzde ciddi bir sorun haline gelmektedir. Özellikle büyük şehirlerdeki yoğun nüfus, beraberinde trafiğe çıkan araç sayısında da artışa neden olduğundan bu olumsuz trafik durumundan çok daha fazla etkilenmektedir. Bu noktada mevcut yol kapasitesinin iyi bir trafik yönetimi ile efektif bir şekilde kullanımı önem kazanmaktadır [9,10].

Literatürde trafik yoğunluğunun azaltılması konusunda en çok yapılan çalışmalar arasında trafik ışıklarının yönetilmesi, dinamik araç paylaşımı, kavşakların yönetilmesi, trafik yoğunluk tespitinin yapılması ve şerit değiştirme modeli çalışmaları yer almaktadır [11-14]. Bu sorunların çözümlerinde gelişen teknoloji ile birlikte kullanımı artan akıllı sistemler yoğun şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, trafik yoğunluğunun azaltılması ile ilgili yapılan çalışmalarda; dijital görüntü işleme, sensörler, çeşitli algoritmalar, VANET, yapay sinir ağları, nesnelerin interneti yöntemlerinin en çok kullanılan yöntemler arasında olduğu görülmektedir [15-25]. Trafik yoğunluğunun tespiti üzerine yapılan mevcut çalışmalar temelde yol güzergahı boyunca oluşan yoğunluk dikkate alınarak sürücülere yeni rota önerildiği durumları incelemektedir [26-28]. Bunun yanı sıra, incelenen bazı çalışmalarda şerit değiştirme modelleri önerilerek trafik yönetimi ve seyahat süresinin

optimizasyonunun sağlanması da amaçlanmıştır [11, 29-31]. Sürücülerin şerit değiştirme davranışının trafik akışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu aşikardır. Yapılan araştırmalar şerit değiştirme süresinin ortalama 5 ila 6 saniye arasında olduğunu göstermektedir. Trafik akışı ile ilgili oluşturulan bir simülasyon modelinden şerit değiştirme sürelerinin çıkarılması, sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır [32]. Bu nedenle sürücülerin zaman kazanmak adına sürekli şerit değiştirme davranışı göstermeleri, trafikte ciddi bir aksamaya neden olmaktadır. Sürücülerin seyahatleri sırasında trafik yoğunluğu hakkında bilgi sahibi olarak bir yol izlemeleri, trafik yoğunluğunun yönetilmesinin yanı sıra trafikte harcanan zamanın ve zararlı gaz salımının azalması gibi birçok katkısı da bulunmaktadır. Örneğin Menegutte vd. [33] tarafından yürütülen bir çalışmada sürücülere sıkışık yollardan kaçınarak yeni rotalar önermek için araçlar arası iletişim (IVC) tabanlı bir çözüm önerilmiş ve bunun sonucunda 1000 araç/km² için CO emisyonunda %10, yakıt tüketiminde %8, seyahat süresinde %9'luk bir azalma sağlandığı ortaya çıkmıştır.

Mevcut çalışmalar irdelendiğinde, tek başına SWOT analizi belirlenen faktörler için nicel bir sonuç vermediği AHP yönteminin SWOT analizine hibritlenmesiyle ortaya çıkan A'WOT analizinin belirlenen faktörlerin birer ağırlığa sahip olmasını sağladığı görülmektedir. Bu sayede analiz sonuçlarına göre yapılacak stratejiler için faktörlerin etkisi göz önüne alınarak daha etkili bir değerlendirme yapma fırsatı sunulmaktadır. Literatürde A'WOT analizi ilk olarak Kurtilla vd. [34] tarafından önerilmiş ve Finlandiya'da orman sertifikasyonu uygulaması yürütülmüştür. Çalışmada, yaygın bir planlama aracı olarak kullanılan SWOT analizinin zayıf yönlerinden olan nicel değer eksikliğinin A'WOT metodunun önerilmesi ile giderildiği ve daha etkili bir analiz sonucu ortaya koyduğu ileri sürülmektedir [34]. A'WOT analizi ortaya çıktığı andan itibaren turizm, çevre bilimi, eğitim, sağlık, üretim gibi stratejik planlamanın yapıldığı birçok farklı alanda tercih edilen bir yöntemdir [35, 36]. Örneğin Bottero vd. [37], kültürel miras varlıklarının yönetimi için A'WOT analizinden yararlanarak tarihi çiftlik evlerinin korunma stratejilerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Lee vd. [38] tarafından bir balıkçı köyünde turizmin canlandırılmasını konu alan bir uygulama yürütülmüştür. Bourhim ve Cherkaoui [39] çalışmalarında A'WOT analizi kullanarak yangın eğitiminde sanal gerçekliğin etkisini konu almıştır. Bir başka çalışmada Jozi vd. [40] kırsal atık yönetimi stratejilerinin belirlenmesi için A'WOT

analizini kullanarak en etkili stratejinin belirlenmesini amaçlamıştır.

A'WOT analiz çerçevesi, ulaştırma endüstrisindeki karmaşıklıkların çözümü noktasında çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. İstekleri, zayıflıkları, fırsatları ve tehditleri iç içe geçirerek kullanan bu teknik, paydaşlara, ortaya çıkan trendler ve yeniliklerden yararlanırken hedefleriyle uyumlu stratejiler geliştirmeleri için güç vermektedir. Ulaşım alanında gelişmeler yaşanmaya devam ederken, A'WOT analizinden elde edilen iç görüleri benimsemek, sürdürülebilir ve verimli bir mobilite geleceğini şekillendirmede çok önemli olmaktadır [41]. A'WOT analizi üzerine yapılan araştırmada Öztaş Karlı ve Karlı [42] A'WOT analizinin ulaşım alanında akıllı ulaşım sistemlerinde mikromobilite potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanıldığını belirlemiştir. Çalışma sonuçlarından Türkiye'de AUS strateji belgelerinin oluşturulduğunu ancak mikromobilite stratejilerinin yetersiz olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, mikromobilite araçlarının farklı ulaşım modlarıyla entegre edilmesinin önemli bir fırsat olduğunu fakat yetersiz mikromobilite altyapısı ve sürüş güvenliğinin olmamasının bu konuda başlıca tehditler olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada A'WOT tekniği kullanılarak önerilen sistemin dört farklı yönden (güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar, tehditler) analiz edilerek sistemin çalışmasında etkili olan faktörlerin önem sırasının belirlenmesi ile geleceğe yönelik plan ve stratejilerin oluşturulmasında destek sağlanması amaçlanmıştır. Mevcut literatür incelendiğinde, trafik yoğunluğunun azaltılabilmesi için yürütülen çalışmaların bazılarında ele alınan soruna teknolojik yaklaşımlar sunulurken; diğer birçok çalışmada da yeni algoritmalar ileri sürülerek çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır [16-18, 31]. Günden güne gelişen ve yaygınlaşan teknolojik yöntemler hayatımızın birçok alanında olduğu gibi ulaşım alanında da kendini göstermektedir. Ancak, tüm bunlara rağmen ana arterlerde hatalı şerit seçim ve kullanım davranışlarından kaynaklanan trafik yoğunluğu sorunu ciddiyetini korumaktadır.

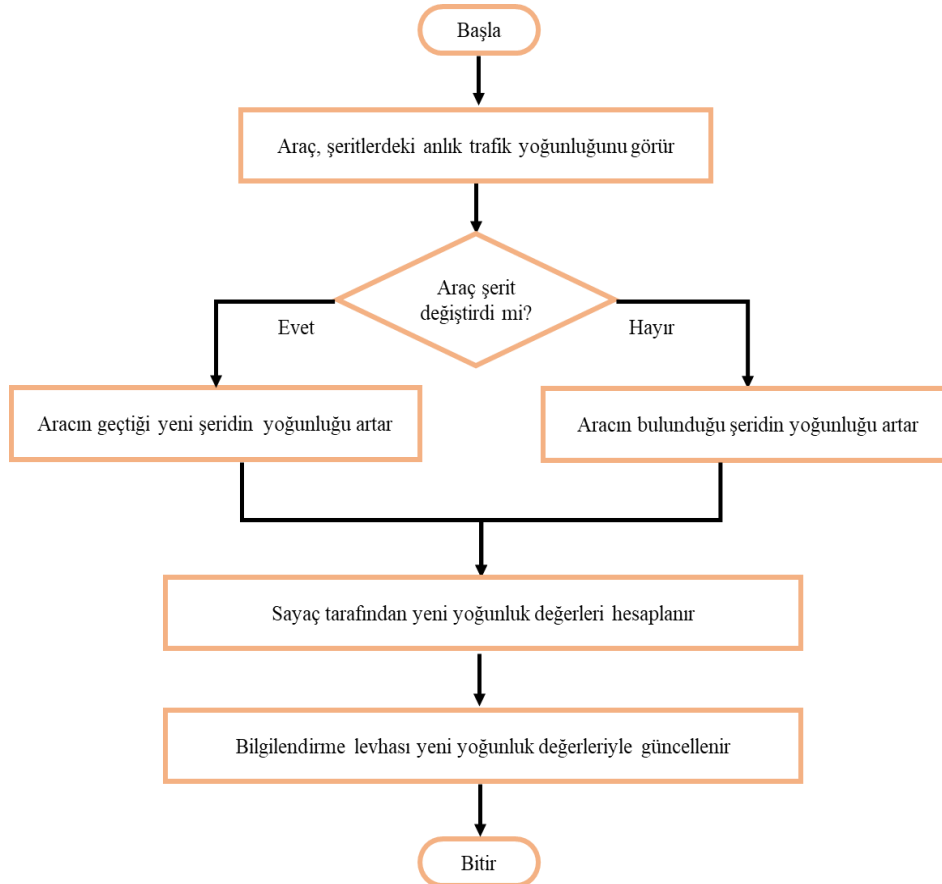
Mevcut birçok çalışma yollardaki yoğunluğu anlık olarak inceleyerek onlara alternatif güzergahlar önerirken; bu çalışma önerilen sistemle iki veya daha fazla şeride sahip ana arterlerde sürücülere anlık olarak her bir şeridin yoğunluğunun bilgisinin verilmesini planlamaktadır.

Çalışma, literatürde benzer çalışmalardan farklı olarak sürücülere şeritlerdeki yoğunluğu anlık olarak vererek; onların trafikte rastgele bir şekilde sürekli şerit değiştirmesini düzenleyebilmeyi amaçlamaktadır ve bunu yaparken de sürücülerin şerit yoğunluklarını görerek bilinçli bir şerit değiştirme davranışı içerisinde olabilmelerini hedeflemektedir. Önerilen bu sistem yardımıyla sol şeridi kullanarak ya da sürekli şerit değiştirerek daha hızlı gidebileceğini düşünen sürücüler bilgilendirilerek; hali hazırda sıkça görülen şerit kullanım disiplinsizliğini en aza indirebilmek beklenmektedir. Böylece çok şeritli ana arterlerde trafik akımını düzenleyen ve yanlış şerit kullanımından kaynaklı oluşan düzensiz yoğunluğun azalmasına katkı sağlayabileceği düşünülen bu tür sistemlerin kullanımının yaygınlaşması arzulanmaktadır.

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Sistem Tasarımı ve İşletimi (System Design and Operation)

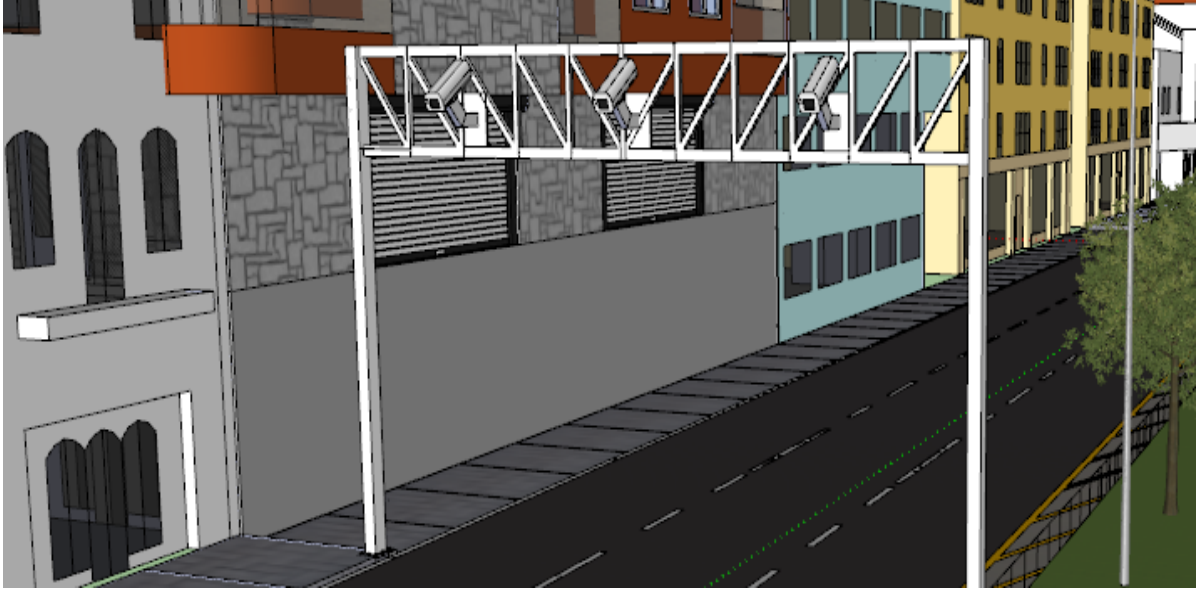
Trafikte sürücülerin şeritlerdeki yoğunluğu göz önüne alarak hareket edeceği şerit ya da şeritleri tercih etmeleri, trafik akışını düzene sokmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir [43]. Sürücülerin yoğunluğu az olan şeritlere yönlendirilmeleri ile şeritlerin kullanım oranları arasında bir denge sağlanarak, ana arter kapasitelerinin efektif bir şekilde kullanımının sağlanacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda trafiğin yoğun ve şerit seçim disiplinsizliğinin fazla olduğu yollarda önerilecek yeni akıllı sistemin çalışma prensibi Şekil 1'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.



Şekil 1. Önerilen sistemin çalışma prensibine ait akış şeması (Flow chart of the working principle of the proposed system)

Çalışma temel olarak şerit seçim disiplinsizliklerinin yoğun olarak gözlemlendiği ve kapasite kaybının fazla olduğu şehiriçi iki ve üç şeritli ana arterlerde bu sistemlerin uygulanmasını hedeflemektedir. Bu kapsamda çalışmada hız limiti 70 km/saat olan, iki veya daha fazla şeride sahip, şehir içi ana arterlerde her 250 metrede bir konumlandırılmak üzere şerit yoğunluk tespiti sayaçları önerilmiştir. Bu sayaçlar ve levhaların

üzerine monte edildiği direkler, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın belirlemiş olduğu azami araç yüksekliğinin 4 metre olması nedeniyle 5 metre yüksekliğinde olacak şekilde tasarlanmıştır [44]. Araç yoğunluğunu plaka okuma ve görüntü işleme sistemi ile tespit edecek olan tag'ların tasarımı ait örnek görsel Şekil 2'de verilmektedir. Çalışmada tüm kurgu ve üç boyutlu çizimler SketchUp® programında hazırlanmıştır (Şekil 2-7).



Şekil 2. Şerit yoğunluk tespit sayaçlarının konumlandırılmasına ait örnek görsel (Example visual of positioning strip density detection meters)

Kameralı sisteme sahip olan sayaçlar, şeritleri 7/24 izlemekte ve bu şeritlerden geçen araçlar hem plakalı okunarak hem de görüntü işleme ile araç tespiti sayesinde tespit edilerek; şerit kullanım yoğunlukları belirlenecektir. Kullanılan kameralarda bulunan plaka tanıma sistemi özelliği sayesinde tespit edilen araçlar, şerit kullanım yoğunluklarının hesaplanması için dikkate alınan bölgeyi terk ettiklerinde bu durum tespit edilecektir. Bu araçlar önceki bölgeden çıkartılarak bir sonraki bölgenin yoğunluk tespiti için yapılan hesaplama

dahil edilecek ve şerit kullanım yoğunlukları sürekli olarak güncellenecektir. Bu yoğunluklar her 500 metrede bir Şekil 3’ de gösterilen bilgilendirme sistemiyle sürücülere sunulurken; sürücüler yoğunluğu az olan şeride geçmeleri doğrultusunda teşvik edilecektir. Yönlendirilmeler sonucunda şerit değiştiren araçlar, bilgilendirme sistemlerinin arka kısmında bulunan kameralar yardımıyla tespit edilerek; arkadan gelen diğer araçlar için güncel yoğunluklar yansıtılacaktır.



Şekil 3. Şerit yoğunluk tespiti tabelalarının gösterimine ilişkin hazırlanan örnek görsel (Sample visual prepared for the display of lane density detection signs)

Yoğunluk oranları %0-49, %50-79, %80-100 olarak 3 sınıfa ayrılacak ve seyir halinde olan sürücülerin kolay algılayabilmesi için %0-49 arasındaki

değerler yeşil renkle, %50-79 arasındaki değerler sarı renkle ve %80-100 arasındaki değerler ise kırmızı renkle gösterilecektir. Bilgilendirme

tabelalarındaki yoğunluk oranları, sürücülerin en az 30 metreden görebileceği büyüklükte yazılarak sürücülerin dikkatine sunulacaktır. Sürecin daha iyi anlaşılması adına bir otobüsün önerilen sistemde ilerleyişi modellenerek; sistemin çalışma prensibine ait örnek bir durum Şekil 4'te gösterilmektedir.

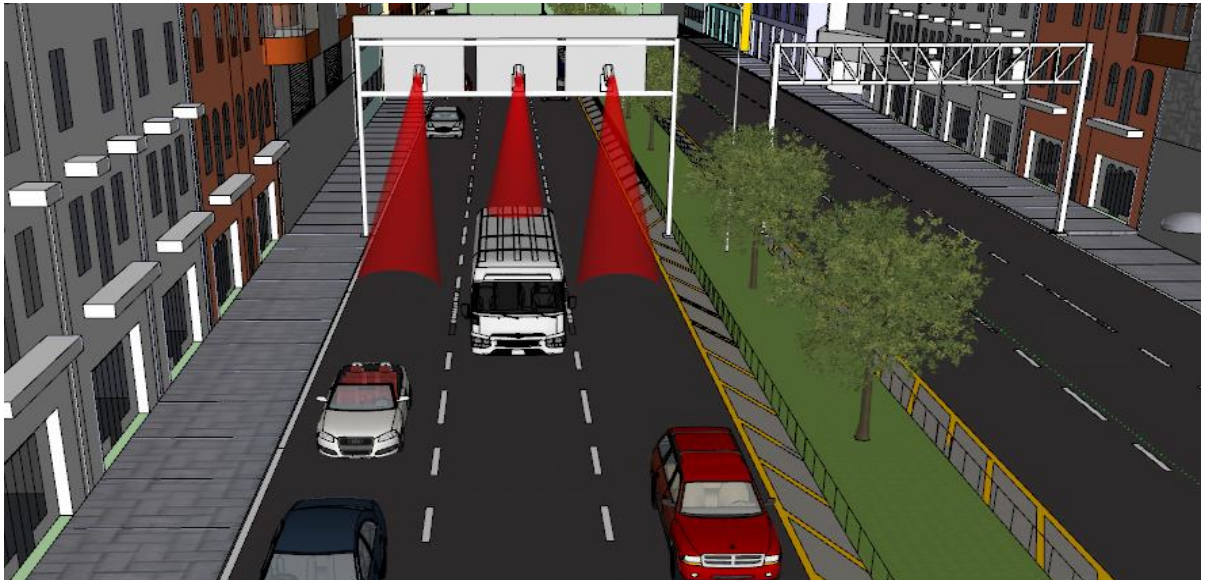
Sistemin kurulu olduğu bir ana arterde ilerleyen otobüs, şerit yoğunluklarının gösterildiği mesaj sistemi sayesinde en az yoğun olan şeridin orta şerit olduğunu görecek ve ihtiyaç duyduğunda şerit değiştirerek bu şeridi kullanabilecektir.



Şekil 4. Sistemin kurulu olduğu örnek bir ana arter tasarımı (A sample arterial design with the system installed)

Otobüs sürücüsünün en az yoğunluğa sahip olan orta şeride geçmesiyle birlikte Şekil 5'te gösterildiği gibi değişken mesaj sistemlerinin arka kısmında her bir şeridi tarayarak sayaç görevi gören üç kamera konumlandırılacaktır. 20 metrelik bir

tarama menziline sahip olan kameralar tarafından taranan otobüsün bir sonraki tarama bölgesine kadar herhangi bir şerit değişikliğinde bulunmadan devam ettiği varsayımına göre yoğunluk oranları hesaplanacaktır.



Şekil 5. Değişken mesaj sistemlerinin arkasında yer alan örnek bir plaka okuma ve görüntü işleme ile araç tespit sistemi (A sample license plate reading and vehicle detection system with image processing behind variable message systems)

İncelenen örnek otobüsün, bilgilendirme ekranlarının arkasında bulunan kameralar ile taranan birinci tarama bölgesinden geçmesinin ardından, otobüsün arkasından gelen araçların gördüğü bilgilendirme ekranı Şekil 6’da gösterildiği gibi yeni oranlar ile güncellenecektir. Bu durum, değişen araç geçiş oranlarına göre sürekli ve anlık olarak güncellenecektir. Birinci tarama bölgesinden geçen otobüs 250 metre sonra Şekil 7’de gösterilen ikinci tarama bölgesine girecektir. Otobüsün ilk tarama alanından geçmesinin ardından eğer şerit değiştirmiş ise bu durum ikinci tarama alanında

tespit edilerek şeritlerin yeni yoğunlukları hesaplanacaktır. İkinci tarama bölgesinden geçen sürücü 250 metre sonra ulaşılan bildirim ekranlarından şeritlerin 500 metrelik yoğunluklarına göre bir şerit tercihinde bulunacak ve süreç sürekli olarak devam edecektir. Böylece daha az yoğun olan şeritleri kullanan, daha kesintisiz ve hız limitleri dahilinde kısa sürede gidecekleri ulaşan sürücülerin kısa süre içerisinde şerit seçim ve kullanım disiplini kazanabilecekleri görülebilecektir.



Şekil 6. Şerit yoğunluklarının değişken mesaj sistemleri üzerinde güncellenmesi (Updating lane densities on variable message systems)



Şekil 7. Bir diğer yoğunluk tespit bölgesine ait örnek görsel (Example image of another density detection zone)

3.2. A'wot Analizi İle Önerilen Sistemin Önceliklerinin Tespiti (Determining the Priorities of The Proposed System with A'wot Analysis)

A'WOT analizi, SWOT (Güçlü yönler, Zayıf yönler, Fırsatlar, Tehditler) analizinde yer alan faktörlerin AHP yöntemi ile sayısallaştırarak önem derecelerinin belirlenmesinde kullanılan bir

yöntemdir. A'WOT analizinin uygulanması temel beş adımdan oluşmaktadır [45]:

Adım 1: SWOT çerçevesinde her bir grup için faktörler belirlenir.

Adım 2: Tablo 1' de gösterilen ve Saaty [46] tarafından önerilen 9 puanlık değerlendirme ölçeğinden yararlanılarak belirlenen faktörlerin ikili karşılaştırmaları yapılır.

Tablo 1. Önem skala değerleri ve tanımları (Importance scale values and definitions) [46]

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	İki seçenekte eşit derecede öneme sahip
3	Orta derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmakta
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmakta
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır
9	Kesin önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanır çok büyük güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler

Adım 3: İkili karşılaştırmalar ile elde edilen matrislerin, Denklem (1) kullanılarak sütun vektörleri hesaplanır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Bu adımda N adet B sütun vektörünün birleşmesiyle bir C matrisi oluşturulur. Oluşturulan bu matris üzerinde Aşağıda verilen Denklem (2) kullanılarak her bir faktör için yerel ağırlıklar hesaplanır.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (2)$$

Adım 4: Dördüncü adımda yerel ağırlıklar elde edildikten sonra ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılığı kontrol edilir. Bunun için ilk olarak karşılaştırma matrisi ile W_i matrisinin çarpımı ile D sütun vektörü elde edilir. Burada Denklem (3)'te gösterildiği gibi D sütun vektörü ile W sütun

vektörünün bölümü ile her bir faktöre ilişkin temel değer (E) elde edilir. Bu değerler Denklem (4)'te kullanılarak λ değeri elde edilir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4)$$

λ değeri hesaplandıktan sonra Denklem (5) ile tutarlılık indeksi (CI) hesaplanır. Ardından Denklem (6) kullanılarak nihai tutarlılık oranı (CR) elde edilir.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Denklem (6)'da kullanılan RI değeri, kriter sayısı dikkate alınarak Tablo 2' ye göre belirlenmektedir.

Tablo 2. RI değerleri (RI values) [37]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

İşlemler sonucunda hesaplanan CR değerinin 0,1' den küçük olması beklenmektedir. CR değeri 0,1'den büyük ise karar verici tarafından ikili karşılaştırmaların tekrarlanması istenmektedir.

Matrisler tutarlı hale gelinceye kadar bu işlem tekrarlanır.

Adım 5: En son adımda ise matrislerin tutarlılığından emin olunmasının ardından son

olarak her bir alternatifin kriterlerinin genel ağırlıkları toplanarak sıralanır. Çalışmada yukarıda belirtilen tüm bu adımlar doğrultusunda ilk olarak önerilen sistemin SWOT

analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 8'de gruplandırılarak gösterilmiştir.

<u>GÜÇLÜ YÖNLER</u>
G1- Şerit kullanımını efektif hale getirmesi
G2- Trafikte tıkanıklığı azaltması
G3- Yol kapasitesinin efektif kullanımının artırması
G4- Sürücülere karar destek sağlaması
G5- Trafikte geçirilen süre ve buna bağlı olarak harcanan yakıt miktarında azalma sağlaması
G6- Plancılara ve karar vericilere araştırmaları için veri sağlaması
<u>ZAYIF YÖNLER</u>
Z1- Sürücülerin bilgilendirmelere rağmen şerit değiştirme eğilimi göstermemeleri
Z2- Dijital mesaj sistemlerinin arızalanma olasılığı
Z3- Şerit değiştiren araçların karmaşaya neden olabilme olasılığı
Z4- Bilgilendirme sistemlerinin görüş alanına girmesiyle şerit değiştiren sürücünün bu sisteme yaklaştığında yoğunlukların değişme ihtimali
Z5- Agresif şerit değiştirmelerin trafik kazalarına neden olma durumu
Z6- Kaldırıma yakın en sağ şerit üzerinde çok fazla durak ve duraklayan araç olma nedeniyle olumsuz durumların gözlenmesi
<u>FIRSATLAR</u>
F1- Sürücülere efektif şerit kullanımı alışkanlığının kazandırılması
F2- Sürücü psikolojisi, yakıt tüketimi ve çevresel yönden daha avantajlı olması
F3- Akıllı şehir olma yolunda akıllı sistem kullanımının yaygınlaşması
F4- Sürücülerin elde edilecek pozitif kazanımlarla bu tür akıllı sistemlere daha iyimser bakarak kurallara ve bilgilendirmelere uyma isteğinin artması
F5- Şeritlerdeki yoğunluğa göre anlık yolculuk sürelerinin tahmininin yapılabilmesi
<u>TEHDİTLER</u>
T1- Yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili
T2- Sistem performansının beğenilmemesi durumu
T3- Sistemin uygulanması sırasında gözlemlenebilecek olumsuz durumlar

Şekil 8. Önerilen sisteme ilişkin SWOT analizi (SWOT analysis of the proposed system)

4. BULGULAR (FINDINGS)

Bir önceki bölümde önerilen şerit yoğunluk tespit sistemine ilişkin yapılan SWOT analizi ile belirlenen güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler ile belirlenen tüm faktörlerin kendi içerisinde ikili karşılaştırmasının yapılması için ulaşım alanında uzman olan 5 kişilik bir uzman ekip seçilmiştir. Uzman kişilerin seçiminde ulaşım alanında tüm paydaşları kapsayacak şekilde ve minimum 10 yıl tecrübe sahiplerinin çalışmaya katılacağı bir yol izlenmiştir. Bu kapsamda

uzmanlardan üç tanesi ulaşım alanında çalışmalar yürüten doktora mezunu akademisyen olarak seçilmiştir. Geriye kalan iki adet akademisyenden bir tanesi bir büyükşehir belediyesi ulaşım dairesinde çalışma konusunda çalışan bir yüksek mühendis ve diğeri ise Karayolları Genel Müdürlüğü bünyesinde çalışan bir yüksek mühendistir. Analizler kapsamında uzmanlara yöneltilen her bir faktör grubu için ikili karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir. Bu

aşamadan sonra Şekil 1’de belirtilen tüm işlem adımları sırasıyla takip edilerek cevaplara ilişkin yerel faktör ağırlıkları belirlenmiştir. Burada belirtilen yerel faktör ağırlıkları, SWOT gruplarının kendi içindeki faktör kıyaslamaları ile elde edilmiştir. Grupların önem derecesinin eşit olduğu varsayılarak, belirlenen grup öncelik değerleri yerel faktör ağırlıkları ile çarpılmış ve her bir faktör için genel faktör ağırlık değerleri belirlenmiştir.

Yöntemin uygulanmasında hesaplama kolaylığı bakımından Expert Choice® programından yararlanılmıştır. Üç farklı karar verici tarafından elde edilen ikili karşılaştırma matrisleri ve bu matrislerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan ortak karar matrisleri Tablo 3-6’ da belirtilmiştir. Elde edilen ortak karar matrisleri üzerinden hesaplanan yerel ve genel faktör ağırlıkları Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 3. Güçlü yönler için karar matrisleri (Decision matrices for strengths)

KV1	G1	G2	G3	G4	G5	G6	KV2	G1	G2	G3	G4	G5	G6
G1	1,00	0,14	0,13	3,00	0,20	1,00	G1	1,00	0,14	0,33	5,00	0,20	3,00
G2	7,00	1,00	1,00	6,00	3,00	5,00	G2	7,00	1,00	5,00	8,00	3,00	7,00
G3	8,00	1,00	1,00	3,00	0,50	2,00	G3	3,00	0,20	1,00	5,00	0,33	5,00
G4	0,33	0,17	0,33	1,00	0,14	0,33	G4	0,20	0,13	0,20	1,00	0,14	0,33
G5	5,00	0,33	2,00	7,00	1,00	4,00	G5	5,00	0,33	3,00	7,00	1,00	5,00
G6	1,00	0,20	0,50	3,00	0,25	1,00	G6	0,33	0,14	0,20	3,00	0,20	1,00

KV3	G1	G2	G3	G4	G5	G6	OKM	G1	G2	G3	G4	G5	G6
G1	1,00	0,14	0,25	4,00	0,14	0,17	G1	1,00	0,14	0,22	3,91	0,18	0,79
G2	7,00	1,00	3,00	8,00	1,00	2,00	G2	7,00	1,00	2,47	7,27	2,08	4,12
G3	4,00	0,33	1,00	5,00	0,20	0,33	G3	4,58	0,41	1,00	4,22	0,32	1,49
G4	0,25	0,13	0,20	1,00	0,13	0,17	G4	0,26	0,14	0,24	1,00	0,14	0,26
G5	7,00	1,00	5,00	8,00	1,00	4,00	G5	5,59	0,48	3,11	7,32	1,00	4,31
G6	6,00	0,50	3,00	6,00	0,25	1,00	G6	1,26	0,24	0,67	3,78	0,23	1,00

Tablo 4. Zayıf yönler için karar matrisleri (Decision matrices for weaknesses)

KV1	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	KV2	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Z1	1,00	3,00	0,33	5,00	0,17	0,20	Z1	1,00	3,00	0,33	5,00	0,14	0,33
Z2	0,33	1,00	0,20	3,00	0,14	0,20	Z2	0,33	1,00	0,14	3,00	0,13	0,20
Z3	3,00	5,00	1,00	7,00	0,14	0,33	Z3	3,00	7,00	1,00	4,00	0,20	0,33
Z4	0,20	0,33	0,14	1,00	0,11	0,14	Z4	0,20	0,33	0,25	1,00	0,11	0,20
Z5	6,00	7,00	7,00	9,00	1,00	3,0	Z5	7,00	8,00	5,00	9,00	1,00	3,00
Z6	5,00	5,00	3,00	7,00	0,33	1,00	Z6	3,00	5,00	3,00	5,00	0,33	1,00

KV3	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	OKM	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Z1	1,00	3,00	0,20	5,00	0,14	0,33	Z1	1,00	3,00	0,28	5,00	0,15	0,28
Z2	0,33	1,00	0,25	3,00	0,13	0,20	Z2	0,33	1,00	0,19	3,00	0,13	0,20
Z3	5,00	4,00	1,00	6,00	0,20	0,33	Z3	3,56	5,19	1,00	5,52	0,18	0,33
Z4	0,20	0,33	0,17	1,00	0,11	0,20	Z4	0,20	0,33	0,18	1,00	0,11	0,18
Z5	7,00	8,00	5,00	9,00	1,00	2,00	Z5	6,65	7,65	5,59	9,00	1,00	2,62
Z6	3,00	5,00	3,00	5,00	0,50	1,00	Z6	3,56	5,00	3,00	5,59	0,38	1,00

Tablo 5. Fırsatlar için karar matrisleri (Decision matrices for opportunities)

KV1	F1	F2	F3	F4	F5	KV2	F1	F2	F3	F4	F5
F1	1,00	0,33	5,00	5,00	3,00	F1	1,00	0,14	3,00	0,50	0,25
F2	3,00	1,00	5,00	4,00	5,00	F2	7,00	1,00	9,00	6,00	3,00
F3	0,20	0,20	1,00	1,00	0,25	F3	0,33	0,11	1,00	0,50	0,17
F4	0,20	0,25	1,00	1,00	0,50	F4	2,00	0,17	2,00	1,00	0,25
F5	0,33	0,20	4,00	2,00	1,00	F5	4,00	0,33	6,00	4,00	1,00

KV3	F1	F2	F3	F4	F5	OKM	F1	F2	F3	F4	F5
F1	1,00	0,33	6,00	5,00	3,00	F1	1,00	0,25	4,48	2,32	1,31
F2	3,00	1,00	7,00	5,00	4,00	F2	3,98	1,00	6,80	4,93	3,91
F3	0,17	0,14	1,00	2,00	0,20	F3	0,22	0,15	1,00	1,00	0,20
F4	0,20	0,20	0,50	1,00	0,25	F4	0,43	0,20	1,00	1,00	0,31
F5	0,33	0,25	5,00	4,00	1,00	F5	0,76	0,26	4,93	3,17	1,00

Tablo 6. Tehditler için karar matrisleri (Decision matrices for threats)

KV1	T1	T2	T3	KV2	T1	T2	T3
T1	1,00	0,33	0,14	T1	1,00	0,17	0,11
T2	3,00	1,00	0,20	T2	6,00	1,00	0,25
T3	7,00	5,00	1,00	T3	9,00	4,00	1,00
KV3	T1	T2	T3	OKM	T1	T2	T3
T1	1,00	0,20	0,11	T1	1,00	0,33	0,12
T2	5,00	1,00	0,20	T2	4,48	1,00	0,22
T3	9,00	5,00	1,00	T3	8,28	4,64	1,00

Tablo 7. A'WOT tekniği sonucunda elde edilen faktör ağırlıklarına ait sonuçlar (Results of the factor weights obtained as a result of the A'WOT technique)

SWOT Grubu	Grup Önceliği	SWOT Faktörleri	Yerel Faktör Ağırlığı	Genel Faktör Ağırlığı	Önem Sırası
1- Güçlü Yönler	0,25	Şerit kullanımını efektif hale getirmesi	0,065	0,016	5
		Trafikte tıkanıklığı azaltması	0,371	0,093	1
		Yol kapasitesinin efektif kullanımını artırması	0,148	0,037	3
		Sürücülere karar destek sağlaması	0,032	0,008	6
		Trafikte geçirilen süre ve buna bağlı olarak harcanan yakıt miktarında azalma sağlaması	0,294	0,074	2
		Plancılara ve karar vericilere araştırmaları için veri sağlaması	0,089	0,022	4
2- Zayıf Yönler	0,25	Sürücülerin bilgilendirmelere rağmen şerit değiştirme eğilimi göstermemeleri	0,090	0,023	4
		Dijital mesaj sistemlerinin arızalanma olasılığı	0,050	0,013	5
		Şerit değiştiren araçların karmaşaya neden olabileceği olasılığı	0,153	0,038	3
		Bilgilendirme sistemlerinin görüş alanına girmesiyle şerit değiştiren sürücünün bu sisteme yaklaştığında yoğunlukların değişme ihtimali	0,029	0,007	6
		Agresif şerit değiştirmelerin trafik kazalarına neden olma durumu	0,453	0,113	1
		Kaldırma yakın en sağ şerit üzerinde çok fazla durak ve duraklayan araç olma nedeniyle olumsuz durumların gözlenmesi	0,226	0,057	2
3- Fırsatlar	0,25	Sürücülere efektif şerit kullanımı alışkanlığının kazandırılması	0,184	0,046	3
		Sürücü psikolojisi, yakıt tüketimi ve çevresel yönden daha avantajlı olması	0,502	0,126	1
		Akıllı şehir olma yolunda akıllı sistem kullanımının yaygınlaşması	0,056	0,014	5
		Sürücülerin elde edilecek pozitif kazanımlarla bu tür akıllı sistemlere daha iyimser bakarak kurallara ve bilgilendirmelere uyma isteğinin artması	0,072	0,018	4
		Şeritlerdeki yoğunluğa göre anlık yolculuk sürelerinin tahmininin yapılabilmesi	0,186	0,047	2
4- Tehditler	0,25	Yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili	0,067	0,017	3
		Sistem performansının beğenilmeme durumu	0,219	0,055	2
		Sistemin uygulanması sırasında gözlemlenebilecek olumsuz durumlar	0,714	0,179	1

Güçlü yönler grubu faktörleri için yerel faktör ağırlıkları incelendiğinde %37 ile en büyük öneme sahip faktörün “Trafik tıkanıklığını azaltması” olurken, en düşük öneme sahip faktörünün %3,2 ile “Sürücülere karar destek sağlaması” olduğu görülmüştür. Zayıf yönler grubu incelendiğinde %45,3 ile “Agresif şerit değiştirmelerin trafik kazalarına neden olma durumu” faktörü en yüksek öneme sahip zayıf yön olarak görülürken, %2,9 ile “Bilgilendirme sistemlerinin görüş alanına girmesiyle şerit değiştiren sürücünün bu sisteme yaklaştığında yoğunlukların değişme ihtimali” en düşük öneme sahip faktör olarak belirlenmiştir. Fırsatlar grubu faktörlerinden “Psikolojik, yakıt tüketimi ve çevresel yönden daha avantajlı olması” faktörü %50,2 ile en yüksek öneme sahip faktör iken %14,2 ile “Akıllı şehir olma yolunda akıllı sistem kullanımının yaygınlaşması” faktörünün en düşük fırsat olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak tehditler grubu için sonuçlar incelendiğinde ise “Sistemin uygulanması sırasında gözlemlenebilecek olumsuz durumlar” faktörü %71,4 ile en önemli faktör olurken, “Yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili” %6,7 ile en düşük faktör olarak belirlenmiştir. Tehditler içerisinde “Sistemin uygulanması sırasında gözlemlenebilecek olumsuz durumlar” üzerinde etkili olabilecek en olumsuz durumun literatür sonuçlarına göre sürücülerin daha az yoğun şeritlere geçiş için yapabilecekleri kontrolsüz şerit değiştirmeler olacağı düşünülmektedir [47, 48].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Ulaşım günlük hayatın temel bir parçasıdır. Bu nedenle her türlü trafik sorunu birçok kişiyi etkilemektedir. Artan araç sayısı ile beraber giderek artan trafik yoğunluğu da bu sorunlardan biridir. Trafik yoğunluğunun artması beraberinde fazla yakıt tüketimi, zaman kaybı, kötüleşen çevresel koşullar, sürücülerde gerginlik, stres gibi birçok olumsuz durumu da beraberinde getirmektedir. Özellikle, nüfus yoğunluğunun fazla olduğu kentlerde giderek daha ciddi bir problem haline gelmektedir. Bu sorunu çözebilmek adına yeni yolların inşa edilmesi bir çözüm yolu olarak görülse de araç sayısının giderek artması bir noktada yol kapasitesinin yeniden yetersiz kalmasına neden olarak kalıcı bir çözüm olarak görülememektedir. Bu noktada daha güvenli, kolay, ekonomik ve hızlı bir çözüm yolu olması nedeniyle akıllı ulaşım sistemleri kavramı dikkat çekmektedir. Son yıllarda

gelişen teknoloji ile birlikte birçok trafik sorununa akıllı ulaşım sistemleri ile çözüm bulunmaktadır. Akıllı ulaşım sistemleri mevcut trafik yoğunluğunu azaltmak için akıllı kavşaklar, sinyalizasyon trafik ışıkları, değişken mesaj sistemleri vb. birçok uygulamayı kapsamaktadır.

Bu çalışma kapsamında trafik akışını düzenlemek, tek bir şeritte araç yoğunluğunun olmasını önlemek ve şeritlerin kullanım oranlarının eşit bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla bir şerit yoğunluk tespit sistemi önerilmiştir. Önerilen bu sistem sayesinde sürücülerin, her beş yüz metrede bir şerit yoğunluk tahminlerine göre en az yoğunluğa sahip şeride geçmesi durumunda yol kapasitesinin daha efektif kullanılmasının sağlanacağı ve trafik yoğunluğunun azalacağı düşünülmektedir. Çalışmanın analiz kısmında ise hibrit bir yöntem olan A’WOT tekniği kullanılmıştır. Bunun için önerilen sistem beş kişilik bir uzman ekip tarafından değerlendirilmiştir. Uygulanan SWOT analizi sonucunda elde edilen faktörler uzman ekip tarafından yapılan ikili karşılaştırmalar ile AHP metodu kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Uygulanan A’WOT analizi sonuçları psikolojik, yakıt tüketimi ve çevresel yönden daha avantajlı bir yöntem olması nedeniyle bir fırsat oluşturduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, önerilen şerit yoğunluk tespit sisteminde en yüksek öneme sahip zayıf yön olarak belirlenen “Agresif şerit değiştirmelerin trafik kazalarına neden olma durumu” faktörü ve en yüksek öneme sahip güçlü yön çalışmanın temel amacına uygun olarak “trafik tıkanıklığını azaltması” olarak belirlenmiştir. Genel faktör ağırlıklarına göre tüm faktörler birlikte değerlendirildiğinde, tehditler grubuna ait bir faktör olan “Sistemin uygulanması sırasında gözlemlenebilecek olumsuz durumlar” faktörü en önemli faktör (%17,9) olarak belirlenmiş ve literatür taraması ile illegal şerit değiştirmelerin bu sonuç üzerinde etkili olabilecek en olumsuz durum olabileceği kanısına varılmıştır. Bu sonuca göre sistemin hayata geçirilmesi durumunda bu tehdit faktörü dikkate alınarak; oluşabilecek illegal şerit değiştirmeler dahil tüm olumsuz durumların incelenmesiyle sistemin daha efektif kullanımının sağlanabileceği düşünülmektedir.

Önerilen şerit yoğunluk tespit sisteminin hayata geçirilmesi sonucunda trafikteki araçların şeritlere eşit bir şekilde dağılımı sağlanarak, düzensiz şerit kullanımı nedeniyle trafik tıkanıklıklarının azalabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra,

araç sayısındaki artışın oluşturduğu yoğunlukla başa çıkabilmek için yeni yollar inşa edilmesi yerine, mevcut altyapı ve imkanların kullanılarak bu tür akıllı sistemlerin kurulmasının birçok açıdan fayda sağlayabileceği öngörülmektedir. Yetkililer, plancılar ve karar vericilerin şehirlerde yeni akıllı ulaşım sistemleri kullanması ile şehirlerin çok kısa sürede akıllı bir şehir formatına dönüşebilecek ve böylece şehirdeki trafiğin izlenmesi mümkün olabilecektir. Tüm hatlarıyla izlenen trafik, yapılacak etkin teknoloji tabanlı müdahaleler ile kontrol edilerek tıkanıklık oluşumlarının derecesi azaltılabilecektir.

Bu çalışma temel olarak şerit kullanım disiplinsizliğinin yoğun olarak gözlemlendiği ülkelerde sürücülerini boş şeritlere yönlendirerek şerit kullanım oranlarını dengelemeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda yapılması gereken ilk iş olan sistem mimarisinin tasarımını önermiştir. Gelecek çalışmalarda, bu tür şerit seçim disiplinsizliklerinin yoğun olduğu kesimler yapılacak saha gözlemleri ile belirlenmeli ve incelenmelidir. Sonraki adımda ise en uygun yerlere önerilen dijital sistemler kurulmalı ve saha testleri yapılmalıdır. Test uygulamalarından elde edilecek sonuçlara göre sistemde gerekli iyileştirme ve kalibrasyonlar yapılarak en iyi performansı veren sistemler elde edilmelidir. Böylece bu tür bir uygulama ülkemizde ilk defa hayata geçirilmiş olacak ve bu konuda öncü bir durumda olunabilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma, British Council tarafından desteklenen "i-gCar4ITS: Innovative and Green Carrier Development for Intelligent Transportation System Applications" başlıklı proje desteğiyle hazırlanmıştır. Yazarlar destekleri için teşekkür eder.

This research was prepared with the project support of the British Council under the main title "i-gCar4ITS: Innovative and Green Carrier Development for Intelligent Transportation System Applications". The authors thank for their support.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The 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)

Metin Mutlu AYDIN: Literatür araştırması ve yöntem bölümlerini hazırlamıştır

He prepared the literature review and method sections.

Başak BIYIK: Analiz, Bulgular ve Sonuç bölümlerini hazırlamıştır.

She prepared the Analysis, Findings and Conclusion sections.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ilıcalı, M., & Saraç, S. (2019). Trafik sıklığının azaltılmasında ulaşım çözümlerinin etkisi. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 93-107.
- [2] Vera-Gómez, J. A., Quesada-Arencibia, A., García, C. R., Suárez Moreno, R., & Guerra Zeroual, A., Harrou, F., & Sun, Y. (2019). Road traffic density estimation and congestion detection with a hybrid observer-based strategy. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101411.
- [3] TÜİK. (2023). Türkiye İstatistik Kurumu, Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2023-49433>
- [4] Delice, M. (2015). Trafik kazalarına etki eden sürücüyle ilgili faktörlerin çoklu regresyon analiziyle incelenmesi. *Uhab Journal*, 4(11), 198-210.
- [5] Ozan, C., Başkan, Ö., Haldenbilen, S., & Dericci, E. (2010). Trafik kazalarının tehlike indeksi metodu ile analizi: Denizli örneği. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(3), 325-333.
- [6] Civelekoğlu, G., & Bıyık, Y. (2018). Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2), 157-166.
- [7] Cao, Z., Jiang, S., Zhang, J., & Guo, H. (2016). A unified framework for vehicle rerouting and traffic light control to reduce traffic congestion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7), 1958-1973.
- [8] Ikiiriwate, A. K., Perera, D. D. R., Samarakoon, S. M. M. C., Dissanayake, D. M. W. C. B., & Rupasinghe, P. L. (2019). Traffic

- density estimation and traffic control using convolutional neural network. In 2019 IEEE International Conference on Advancements in Computing (ICAC), pp. 323-328.
- [9] Basavaraju, A., Doddigarla, S., Naidu, N., & Malgatti, S. (2014). Vehicle density sensor system to manage traffic. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2319-1163.
- [10] Jagadeesh, Y. M., Suba, G. M., Karthik, S., & Yokesh, K. (2015). Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors. In 2015 IEEE International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS), pp. 123-126.
- [11] Zhang, Y., & Ioannou, P. A. (2016). Combined variable speed limit and lane change control for highway traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7), 1812-1823.
- [12] Li, Y., & Liu, Q. (2020). Intersection management for autonomous vehicles with vehicle-to-infrastructure communication. *PLoS one*, 15(7), e0235644.
- [13] Arifin, A. S., & Zulkifli, F. Y. (2021). Recent development of smart traffic lights. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 10(1), 224.
- [14] Madrigal Arteaga, V. M., Pérez Cruz, J. R., Hurtado-Beltrán, A., & Trumpold, J. (2022). Efficient Intersection Management Based on an Adaptive Fuzzy-Logic Traffic Signal. *Applied Sciences*, 12(12), 6024.
- [15] Knorr, F., Baselt, D., Schreckenber, M., & Mauve, M. (2012). Reducing traffic jams via VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3490-3498.
- [16] Kanungo, A., Sharma, A., & Singla, C. (2014). Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing. In 2014 IEEE Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS), pp. 1-6.
- [17] Kavva, G., & Saranya, B. (2015). Density based intelligent traffic signal system using PIC microcontroller. *International Journal of Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 3(1), 205-209.
- [18] Ghazal, B., EIKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016). Smart traffic light control system. In 2016 IEEE Third International Conference On Electrical, Electronics, Computer Engineering and Their Applications (EECEA), pp. 140-145.
- [19] Bauza, R., & Gozálviz, J. (2013). Traffic congestion detection in large-scale scenarios using vehicle-to-vehicle communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(5), 1295-1307.
- [20] Soomro, S., Miraz, M. H., Prasanth, A., & Abdullah, M. (2018). Artificial intelligence enabled IoT: traffic congestion reduction in smart cities. In *IET Smart Cities Symposium 2018 (SCS '18)*, 22-23 April 2018, pp. 81-86.
- [21] Hu, H., Gao, Z., Sheng, Y., Zhang, C., & Zheng, R. (2019). Traffic density recognition based on image global texture feature. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 17, 171-180.
- [22] Frank, A., Al Aamri, Y. S. K., & Zayegh, A. (2019). IoT based smart traffic density control using image processing. In 2019 IEEE 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), pp. 1-4.
- [23] Biswas, D., Su, H., Wang, C., Stevanovic, A., & Wang, W. (2019). An automatic traffic density estimation using Single Shot Detection (SSD) and MobileNet-SSD. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 110, 176-184.
- [24] Altay, A. B. & Demirhan, A. (2023). Boş park yerlerinin tespiti ve kullanıcıya mobil uygulama ile yol tarifi verilmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(1), 68-80.
- [25] Alisoltani, N., Leclercq, L., & Zargayouna, M. (2021). Can dynamic ride-sharing reduce traffic congestion? *Transportation Research Part B: Methodological*, 145, 212-246.
- [26] Budiarto, J., Sulisty, S., Mustika, I. W., & Infantono, A. (2014). Road density prediction: Updated methods of turning probabilities and highway capacities manual for achieving the best route. In 2014 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), pp. 168-173.
- [27] De Souza, A. M., Yokoyama, R. S., Botega, L. C., Meneguette, R. I., & Villas, L. A. (2015). Scorpion: A solution using cooperative rerouting to prevent congestion and improve traffic condition. In 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing, pp. 497-503.
- [28] Barrachina, J., Garrido, P., Fogue, M., Martinez, F. J., Cano, J. C., Calafate, C. T., & Manzoni, P. (2015). A V2I-based real-time traffic density estimation system in urban scenarios. *Wireless Personal Communications*, 83, 259-280.

- [29] Khan, U., Basaras, P., Schmidt-Thieme, L., Nanopoulos, A., & Katsaros, D. (2014). Analyzing cooperative lane change models for connected vehicles. In 2014 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), pp. 565-570.
- [30] Roncoli, C., Bekiaris-Liberis, N., & Papageorgiou, M. (2017). Lane-changing feedback control for efficient lane assignment at motorway bottlenecks. *Transportation Research Record*, 2625(1), 20-31.
- [31] Ramezani, M., & Ye, E. (2019). Lane density optimisation of automated vehicles for highway congestion control. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 1096-1116.
- [32] Toledo, T., & Zohar, D. (2007). Modeling duration of lane changes. *Transportation Research Record*, 1999(1), 71-78.
- [33] Meneguette, R. I., Filho, G. P., Guidoni, D. L., Pessin, G., Villas, L. A., & Ueyama, J. (2016). Increasing intelligence in inter-vehicle communications to reduce traffic congestions: Experiments in urban and highway environments. *PLoS one*, 11(8), e0159110.
- [34] Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis—a hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest policy and economics*, 1(1), 41-52.
- [35] Bourhim, E. M., & Labti, O. (2022, December). Application of Combined SWOT and AHP Analysis to Assess the Virtual Reality and Select the Priority Factors for Education. In *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications* (pp. 512-521). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [36] Zhang, H., Mehrotra, D. V., & Shen, J. (2023). AWOT and CWOT for genotype and genotype-by-treatment interaction joint analysis in pharmacogenetics GWAS. *Bioinformatics*, 39(1), btac834.
- [37] Bottero, M., D'Alpaos, C., & Marelllo, A. (2020). An application of the a'WOT analysis for the management of cultural heritage assets: the case of the historical farmhouses in the aglie castle (Turin). *Sustainability*, 12(3), 1071.
- [38] Lee, S., Kim, D., Park, S., & Lee, W. (2021). A study on the strategic decision making used in the revitalization of fishing village tourism: using A'WOT analysis. *Sustainability*, 13(13), 7472.
- [39] Bourhim, E. M., & Cherkaoui, A. (2020). Exploring the potential of virtual reality in fire training research using A'WOT hybrid method. In *Intelligent Systems, Technologies and Applications: Proceedings of Fifth ISTA 2019, India* (pp. 157-167). Springer Singapore.
- [40] Jozi, S. A., Dehghani, M., & Zarei, M. (2013). Rural waste management strategic plan by A'WOT Method (Case study: Minab). *Journal of Environmental Studies*, 38(4), 93-108.
- [41] Bottero, M., D'Alpaos, C., & Marelllo, A. (2020). An application of the a'WOT analysis for the management of cultural heritage assets: the case of the historical farmhouses in the aglie castle (Turin). *Sustainability*, 12(3), 1071.
- [42] Öztaş Karlı, R. G., & Karlı, H. (2022, October). Assessment of the Role of Micromobility in ITS by A'WOT Analysis. In *The Proceedings of the International Conference on Smart City Applications* (pp. 226-236). Cham: Springer International Publishing.
- [43] Aydın, M. M. (2021). Method for modeling lane-based driving discipline of drivers on divided multilane urban roads. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147(4), 04021011.
- [44] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB) (2023). Ağırılık ve boyut kontrolü, <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/kutuphane/a3f43dbbb7bb488.pdf>
- [45] Lee, S., Kim, D., Park, S., & Lee, W. (2021). A study on the strategic decision making used in the revitalization of fishing village tourism: using A'WOT analysis. *Sustainability*, 13(13), 7472.
- [46] Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal Of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- [47] Aydın, M. M., Yıldırım, M. S., Karpuz, O., & Ghasemlou, K. (2014). Modeling of driver lane choice behavior with artificial neural networks (ANN) and linear regression (LR) analysis on deformed roads. *Computer Science*, 4(1), 47-57.
- [48] Aydın, M. M., & Topal, A. (2018). Effects of pavement surface deformations on lane-changing behaviours. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Transport*, 171(3), 136-145.

Effect of Gallium Content on Diode Characteristics and Solar Cell Parameters of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ Thin Film Solar Cells Produced by Three-stage Co-evaporation at Low Temperature

Semih AĞCA^{1*}  Güven ÇANKAYA¹ 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/10/2023
Revision: 03/11/2023
Accepted: 04/11/2023

Keywords

Thin Film
Solar Cell
Diode Characteristics
Gallium Content

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/10/2023
Düzeltilme: 03/11/2023
Kabul: 04/11/2023

Anahtar Kelimeler

İnce Film
Güneş Pili
Diyot Özellikleri
Galyum Miktarı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells with x values of 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 were successfully produced by three-stage co-evaporation technique at low temperatures. / Bu çalışmada, x değerleri 0,17, 0,20, 0,23 ve 0,26 olan $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pilleri, düşük sıcaklıklarda üç aşamalı eş-buharlaştırma tekniği ile başarıyla üretildi.

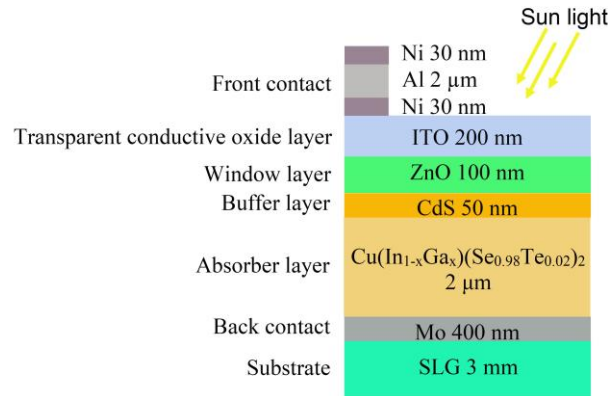


Figure A: Schematic illustration of the thin film solar cell / Şekil A: İnce film güneş pilinin şematik gösterimi

Highlights (Önemli noktalar)

- $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells have been produced by three-stage co-evaporation. / $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pilleri üç aşamalı eş-buharlaştırma ile üretilmiştir.
- The change trend of solar cell parameters was similar to the change trend of diode quality. / Güneş pili parametrelerinin değişim eğilimi, diyot kalitesindeki değişim eğilimiyle benzerlik göstermiştir.
- The efficiency of the solar cell was improved by optimizing the GGI ratio. / Güneş pilinin verimi GGI oranı optimize edilerek iyileştirilmiştir.

Aim (Amaç): In this study, it was aimed to increase the efficiency of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cell by optimizing the amount of gallium. / Bu çalışmada, galyum miktarını optimize ederek $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pilinin veriminin artırılması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells with different x values have been produced by three-stage co-evaporation technique for the first time. / Farklı x değerlerine sahip $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pilleri üç aşamalı eş-buharlaştırma tekniği ile ilk kez üretilmiştir.

Results (Bulgular): The increase in gallium content decreased the ideality factor and increased the barrier height up to the GGI ratio of 0.23. The sample Ga0.23 was found to have the highest diode quality with the lowest ideality factor value. The change trend of solar cell parameters was similar to the change trend of diode quality. / 0,23 GGI oranına kadar galyum miktarındaki artış idealite faktörünü azaltmış ve bariyer yüksekliğini artırmıştır. Ga0.23 numunesinin en düşük idealite faktörü değeri ile en yüksek diyot kalitesine sahip olduğu bulunmuştur. Güneş pili parametrelerinin değişim eğilimi, diyot kalitesindeki değişim eğilimiyle benzerlik göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): The power conversion efficiency of the SLG/Mo/ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ /CdS/ZnO/ITO/Ni-Al-Ni thin film solar cells was increased from 3.7% to 6.3% by increasing the GGI ratio from 0.17 to 0.23. / GGI oranı 0,17'den 0,23'e çıkarılarak SLG/Mo/ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ /CdS/ZnO/ITO/Ni-Al-Ni ince film güneş pillerinin güç dönüşüm verimliliği %3,7'den %6,3'e yükseltilmiştir.



Effect of Gallium Content on Diode Characteristics and Solar Cell Parameters of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ Thin Film Solar Cells Produced by Three-stage Co-evaporation at Low Temperature

Semih AĞCA^{1*} Güven ÇANKAYA¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/10/2023
Revision: 03/11/2023
Accepted: 04/11/2023

Keywords

Thin Film
Solar Cell
Diode Characteristics
Gallium Content

Abstract

In this study, $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells with x values of 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 were successfully produced by three-stage co-evaporation technique at low temperatures. The diode characteristics and solar cell parameters of thin film chalcopyrite solar cells with the structure of $\text{SLG}/\text{Mo}/\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2/\text{CdS}/\text{ZnO}/\text{ITO}/\text{Ni}-\text{Al}-\text{Ni}$ were investigated by current-voltage measurements. The ideality factor, series resistance, and barrier height were obtained by the Cheung-Cheung method using the current-voltage results measured in the dark at room temperature. Open-circuit voltage, short-circuit current density, fill factor, and the power conversion efficiency of the thin film solar cells were derived from the current-voltage measurements realized by a four-point measurement setup under AM1.5G standards at room temperature. It was found that the increase in the gallium content first decreased the ideality factor, however, it increased again after exceeding the x value of 0.23. While the amount of gallium was increasing, fluctuations were observed in the series resistance values. The barrier height first increased with the increasing amount of gallium and decreased after exceeding the x value of 0.23. The solar cell parameters increased by increasing the x value up to 0.23 and decreased after exceeding this point. It was found that the diode parameters have an effect on each other but the most effective diode parameter was the ideality factor. The efficiency of the $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells was increased from 3.7% to 6.3% by increasing the x value from 0.17 to 0.23.

Galyum Miktarının Düşük Sıcaklıkta Üç Aşamalı Eş-Buharlaştırma ile Üretilen $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ İnce Film Güneş Pillerinin Diyot Özellikleri ve Güneş Pili Parametreleri Üzerine Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/10/2023
Düzeltilme: 03/11/2023
Kabul: 04/11/2023

Anahtar Kelimeler

İnce Film
Güneş Pili
Diyot Özellikleri
Galyum Miktarı

Öz

Bu çalışmada, x değerleri 0.17, 0.20, 0.23 ve 0.26 olan $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pilleri, düşük sıcaklıklarda üç aşamalı eş-buharlaştırma tekniği ile başarıyla üretildi. $\text{SLG}/\text{Mo}/\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2/\text{CdS}/\text{ZnO}/\text{ITO}/\text{Ni}-\text{Al}-\text{Ni}$ yapısına sahip ince film kalkopirit güneş pillerinin diyot özellikleri ve güneş pili parametreleri akım-gerilim ölçümleri ile incelendi. İdealite faktörü, seri direnç ve bariyer yüksekliği, oda sıcaklığında karanlıkta ölçülen akım-gerilim sonuçları kullanılarak Cheung-Cheung yöntemiyle elde edildi. İnce film güneş pillerinin açık devre gerilimi, kısa devre akım yoğunluğu, dolgu faktörü ve güç dönüşüm verimliliği, oda sıcaklığında AM1.5G standartlarında dört noktalı ölçüm düzeneği ile gerçekleştirilen akım-gerilim ölçümlerinden elde edilmiştir. Galyum içeriğindeki artışın önce idealite faktörünü azalttığı, ancak x değeri 0,23'ü geçtikten sonra tekrar arttırdığı tespit edilmiştir. Galyum miktarı artarken seri direnç değerlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bariyer yüksekliği galyum miktarının artmasıyla önce artmış, x değeri 0,23'ü geçtikten sonra azalmıştır. Güneş pili parametreleri x değerinin 0,23'e kadar artmasıyla artmış, bu noktanın aşılmasıyla azalmıştır. Diyot parametrelerinin birbirini etkilediği ancak en etkili diyot parametresinin idealite faktörü olduğu tespit edilmiştir. $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ ince film güneş pillerinin verimliliği, x değeri 0,17'den 0,23'e artırılarak %3,7'den %6,3'e çıkarılmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The copper indium gallium selenide (CIGS) compound is a member of the chalcogenide group with its chalcopyrite structure and contains at least one chalcogen (S, Se, Te) in its composition [1,2]. There are also applications such as $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ and $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,Te})_2$, where these chalcogens are in the structure together [3-7]. CIGS thin films are very suitable for thin film solar cell applications with features such as tunable bandgap, stability, and high absorption coefficient [8-10].

Research on thin films and solar cells containing selenium and sulfur as chalcogens has increased considerably. On the other hand, although thin film research containing tellurium as chalcogen has reached a certain number, studies on chalcopyrite solar cells containing tellurium are very few [11-13].

The main motivation for adding tellurium to CIGS solar cells is to reduce the bandgap value and use the CIGS solar cell as the bottom cell of the tandem solar cells [14,15]. However, by adding a low amount of tellurium to the CIGS structure, it is also possible to control the properties of gallium in the structure without reducing the bandgap value [13]. Since the addition of gallium increases the bandgap value, the amount of gallium is very low in studies where the bandgap value is tried to be reduced [16]. On the other hand, in the study where tellurium was added to control the properties of gallium, the amount of gallium was quite high [13].

The issue of how gallium and tellurium affect each other in the presence of moderate amounts of gallium in a CIGS solar cell with tellurium addition has not yet been investigated. In this study, the effect of the gallium amount of the $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ solar cell on the diode parameters by changing the x values to 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 and how the photovoltaic parameters are affected accordingly was examined in a systematic approach.

After the huge potential in electricity production with solar cells was realized, there has been a significant increase in the production of all types of solar cells [17]. Since high temperatures that the substrate material can withstand are generally used

for high-efficiency thin film production, the production cost is high. The total thermal budget can be reduced by developing the production of high-efficiency solar cells at lower temperatures. In this study, the production of thin film solar cells at low temperatures was investigated to reduce the production cost.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

$\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film absorbers with x values of 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 were deposited on molybdenum coated soda lime glass (SLG) substrates by three-stage co-evaporation method using a multi-source physical vapor deposition chamber under 2×10^{-7} mBar vacuum atmosphere. NaF post-deposition treatment was applied after absorber deposition without breaking the vacuum of the chamber.

The final thickness of the absorbers was about 2 μm . The substrate temperature was set to 480°C to reduce the thermal budget. CdS was coated on the absorbers by chemical bath deposition. ZnO and indium tin oxide (ITO) layers were deposited by RF magnetron sputtering. The thicknesses of CdS, ZnO, and ITO were around 50, 100, and 200 nm, respectively. The front contact, consisting of Ni-Al-Ni layers, was coated by e-beam evaporation. The thickness of the aluminum layer was 2 μm and that of the nickel layers was 30 nm.

The diode characteristics and solar cell parameters of thin film chalcopyrite solar cells with SLG/Mo/Cu(In_{1-x}Ga_x)(Se_{0.98}Te_{0.02})₂/CdS/ZnO/ITO/Ni-Al-Ni structure were analyzed by current-voltage (I-V) measurements. The ideality factor (n), series resistance (R_s), and barrier height (Φ_B) were obtained by the Cheung-Cheung method using the I-V results measured in the dark at room temperature.

Open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current density (J_{sc}), fill factor (FF), and the power conversion efficiency (PCE) of the solar cells were derived from the I-V results measured by a four-point measurement setup under AM1.5G standards with 1000 W/m² illumination at room temperature. The chemical composition of absorber layers was obtained by energy dispersive spectroscopy (EDS) under 15 kV voltage. The samples with x values of 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 were named Ga0.17, Ga0.20, Ga0.23, and Ga0.26, respectively.

3. RESULTS (BULGULAR)

The chemical composition of the absorber layers is shown in Table 1. Ga/(Ga+In) (GGI) and

Cu/(Ga+In) (CGI) ratios, which are very important for solar cell parameters, can be calculated from Table 1. The GGI ratio is also equal to the x value of the samples.

Table 1. The chemical composition of the absorber layers (Absorbe edici katmanların kimyasal bileşimi)

Sample	Cu (at. %)	In (at. %)	Ga (at. %)	Se (at. %)	Te (at. %)
Ga0.17	21.82	21.04	4.38	51.73	1.03
Ga0.20	21.75	20.19	5.19	51.89	0.98
Ga0.23	21.91	19.76	5.95	51.37	1.01
Ga0.26	21.80	19.04	6.76	51.44	0.96

According to the calculations made using the data given in Table 1, the CGI ratios of the samples were approximately 0.85. This ratio is slightly lower than the CGI ratio in similar studies where high solar cell efficiency was achieved [18]. As can be seen from Table 1, the increase in the GGI ratios of the absorbers was adjusted by the increase of gallium and the decrease of indium. This adjustment was achieved by changing the temperatures of the gallium and indium sources of the multi-source physical vapor deposition chamber. When the Te/(Te+Se) (TTS) ratio was calculated according to the values in Table 1, it was seen that this ratio was approximately 0.02 for all absorbers. It was observed that the TTS ratio was slightly higher compared to solar cell studies in which selenium and tellurium were used together as chalcogens [13].

Cheung method [19] which can be expressed as follows:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \tag{1}$$

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \tag{2}$$

$$H(I) = IR_S + n\Phi_B \tag{3}$$

In equation (1), V, I, n, k, T, q, and R_S represent the voltage, current, ideality factor, Boltzmann's constant, temperature in Kelvin, electron charge, and series resistance, respectively. In equation (2), A* represents the Richardson constant which equals 84 A/cm²K² for p-type CIGS [20]. In equation (3), Φ_B represents the barrier height. The ideality factor and series resistance can be derived from the dV/dlnI versus I graphs shown in Figure 1.

The ideality factor (n), series resistance (R_S), and barrier height (Φ_B) were obtained by the Cheung-

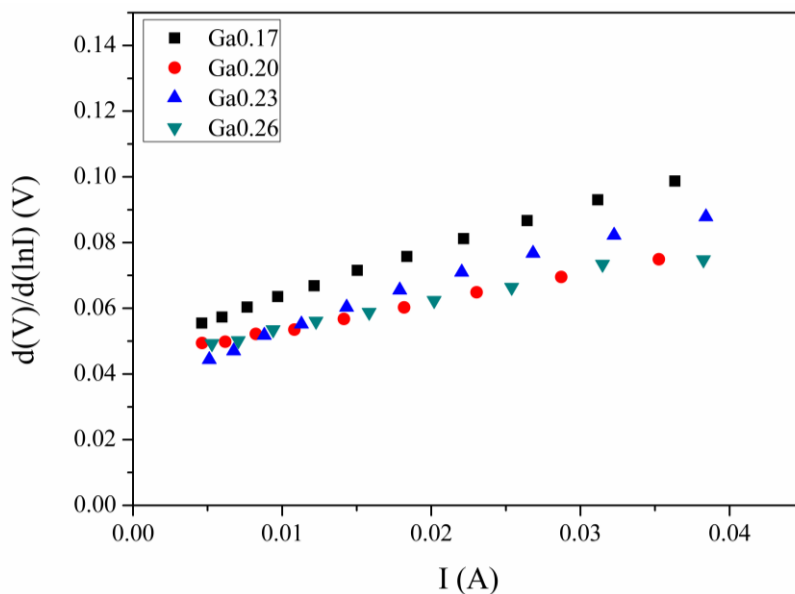


Figure 1. dV/dlnI versus I graphs (dV/dlnI ve I grafikleri)

According to equation (1), the slope of the best fits of the $dV/d\ln I$ versus I graphs equals R_s and the ideality factor can be calculated by dividing the y-axis intercept of the best fits by kT/q . R_s values of the samples Ga0.17, Ga0.20, Ga0.23, and Ga0.26 were found to be 1.38, 0.85, 1.32, and 0.82 $k\Omega$,

respectively. On the other hand, the ideality factor values of the samples were calculated according to the equation (1) and were found to be 1.90, 1.74, 1.51, and 1.74, respectively. The barrier height can be derived from the $H(I)$ versus I graphs shown in Figure 2.

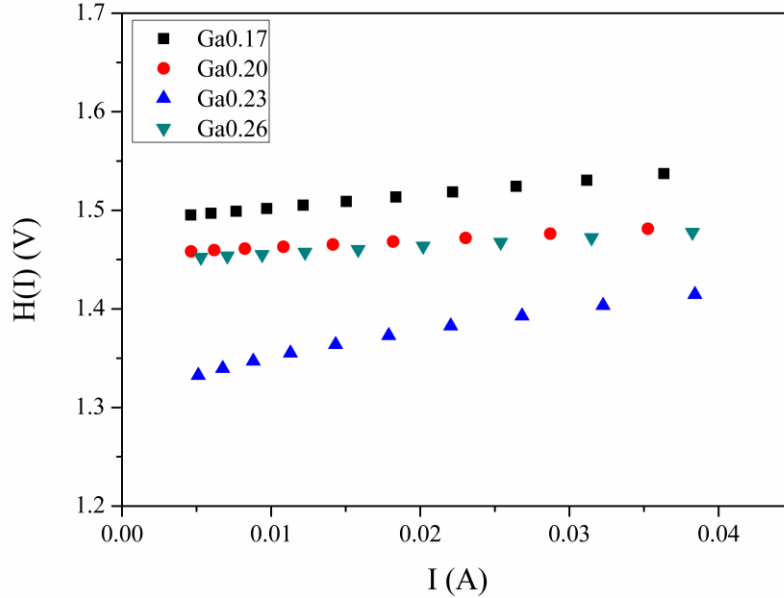


Figure 2. $H(I)$ versus I graphs ($H(I)$ ve I grafikleri)

According to equation (3), the barrier height can be calculated by dividing the y-axis intercept of the best fits of the $H(I)$ versus I graphs by the ideality factor values obtained from equation (1). Barrier height values of the samples Ga0.17, Ga0.20,

Ga0.23, and Ga0.26 were found to be 0.78, 0.83, 0.96, and 0.76 eV, respectively. The ideality factor (n), series resistance (R_s), and barrier height (Φ_B) values of the samples are shown in Table 2.

Table 2. The diode parameters of the solar cells (Güneş pillerinin diyot parametreleri)

Sample	Ideality factor (n)	Series resistance (R_s) ($k\Omega$)	Barrier height (Φ_B) (eV)
Ga0.17	1.90	1.38	0.78
Ga0.20	1.74	0.85	0.83
Ga0.23	1.51	1.32	0.96
Ga0.26	1.74	0.82	0.76

The ideality factor shows the deviation of a diode from the thermionic emission model and should be 1 for an ideal diode [21]. As seen in Table 2, the sample with the highest diode quality is the Ga0.23 sample which deviates the least from ideal diode behavior. The increase in the amount of gallium first decreased the ideality factor, but it increased again after the GGI ratio of 0.23. The reason for high ideality factor values may be the current mechanism of the solar cell, the barrier height inhomogeneity, and the recombination-generation mechanism [22,23]. As the amount of gallium increased, fluctuations were observed in the series resistance

values. On the other hand, the barrier height first increased with the increasing amount of gallium and decreased after exceeding the GGI ratio of 0.23. Contrary to the linear relationship in the literature [24], there is an inverse relationship in the results. This may be due to the absorber/CdS interface inhomogeneities which can be affected by the gallium amount. Another reason may be the fact that the addition of tellurium may have triggered the formation of an additional barrier in the back contact region by causing the gallium in the structure to accumulate on the back contact side [13]. In this way, as the amount of gallium in the

structure increases, the barrier height may also increase. The decrease of the barrier height after the GGI ratio exceeded 0.23 may be due to the decrease

in the series resistance [25]. Solar cell parameters of the samples were derived from the current density-voltage graphs which are shown in Figure 3.

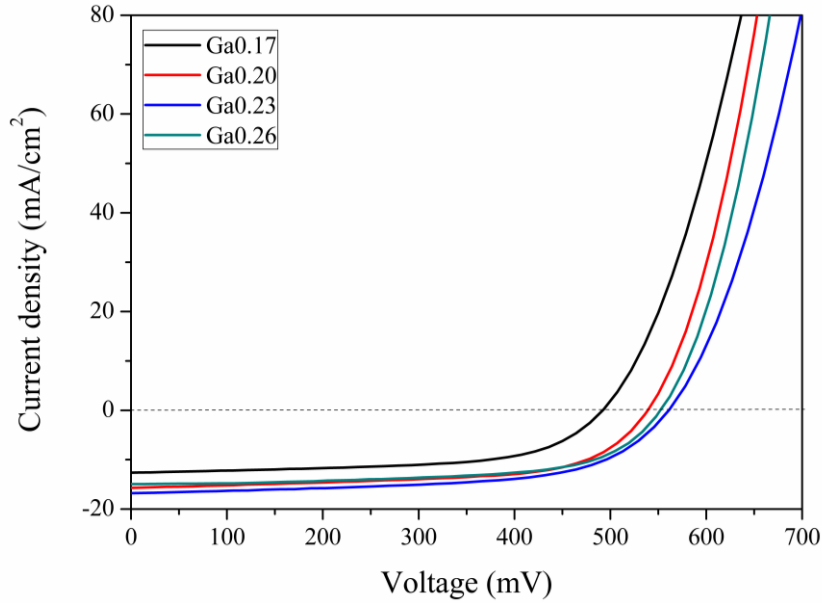


Figure 3. Current density-voltage graphs (Akım yoğunluğu-voltaj grafikleri)

As can be seen in Figure 3, the current at zero voltage, the voltage at zero current, and the area of the part of the graph below zero current are equal to the J_{sc} , V_{oc} , and FF, respectively. Then the PCE can be calculated by using these parameters. It is clear from Figure 3 that, the J_{sc} value increased by increasing the gallium amount up to the GGI ratio of 0.23 and then decreased by increasing the gallium amount further. Moreover, the same trend is also seen in V_{oc} and FF values. According to the

literature, as the slope in the high voltage region of the J-V graph decreases, the series resistance increases [26]. This situation was found to be in good agreement with the data obtained by the Cheung-Cheung method. Ga0.17 and Ga0.23 samples had higher series resistance values than those of Ga0.20 and Ga0.26 samples. The trend in the change of the solar cell parameters V_{oc} , J_{sc} , FF, and PCE with the increasing gallium content is shown in Figure 4 for a better understanding.

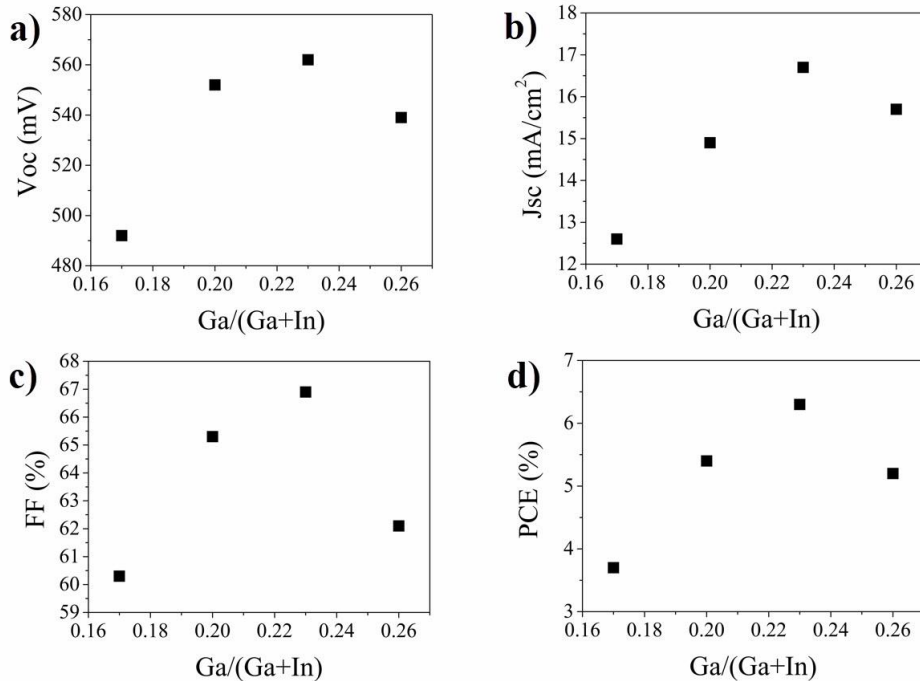


Figure 4. The trend in the change of the solar cell parameters a) V_{oc} , b) J_{sc} , c) FF, and d) PCE (Güneş pili parametrelerinin değişim eğilimi a) V_{oc} , b) J_{sc} , c) FF ve d) PCE)

As can be clearly seen in Figure 4, all the solar cell parameters increased by increasing the GGI ratio up to 0.23 and decreased after this point. The reason for the decrease in solar parameters in the sample with the highest GGI ratio may be due to deeper defects acting as recombination centers generated by the high gallium content [27]. Another reason may be

the fact that the increase in gallium content may enhance the amount of ordered vacancy compounds (OVCs), which can affect the recombination mechanism of the solar cells [28]. The solar cell parameters of the samples are also shown in Table 3.

Table 3. The solar cell parameters of the samples (Numunelerin güneş pili parametreleri)

Sample	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Ga0.17	492	12.6	60.3	3.7
Ga0.20	552	14.9	65.3	5.4
Ga0.23	562	16.7	66.9	6.3
Ga0.26	539	15.7	62.1	5.2

When the data in Table 2 and Table 3 are evaluated together, it is understood that the most effective diode parameter on solar parameters is the ideality factor. Although other diode parameters had an effect on the ideality factor, it was observed that they did not have a significant effect on the solar cell parameters. It can be seen from Table 3 that the efficiency of the $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ solar cells was increased from 3.7% to 6.3% by increasing the GGI ratio from 0.17 to 0.23.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

$\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ thin film solar cells with x values of 0.17, 0.20, 0.23, and 0.26 were successfully produced at low temperatures. The effect of the gallium amount of the $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2$ solar cell on the diode parameters and the photovoltaic parameters was investigated. The ideality factor, series resistance, and barrier height were obtained by the Cheung-Cheung method. The increase in the gallium content first decreased the ideality factor, however, it increased again after exceeding the GGI ratio of 0.23. The sample Ga0.23 was found to have the highest diode quality with the lowest ideality factor value. As the amount of gallium increased, fluctuations were observed in the series resistance values. On the other hand, the barrier height first increased with the increasing amount of gallium and decreased after exceeding the GGI ratio of 0.23. Solar cell parameters of the samples were derived from the current density-voltage graphs. Series resistance values calculated by the Cheung-Cheung method were found to be in good agreement with the current density-voltage graphs. The change trend of solar cell parameters was similar to the change trend of diode quality. All the solar cell parameters increased by increasing the GGI ratio up to 0.23 and decreased after exceeding this point. It

was found that the diode parameters have an effect on each other but the most effective diode parameter was the ideality factor. The power conversion efficiency of the $\text{SLG}/\text{Mo}/\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{0.98}\text{Te}_{0.02})_2/\text{CdS}/\text{ZnO}/\text{ITO}/\text{Ni-Al-Ni}$ thin film solar cells was increased from 3.7% to 6.3% by increasing the GGI ratio from 0.17 to 0.23.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by "TÜBİTAK 2214-A and TÜBİTAK 2211-C Programmes". The authors also would like to thank to PV Group of Prof. Dr. Roland Scheer in the Physics Institute of Martin-Luther University Halle-Wittenberg for their support with the laboratory infrastructure.

Bu çalışma "TÜBİTAK 2214-A ve TÜBİTAK 2211-C Programları" tarafından desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca laboratuvar altyapısına verdikleri destek için Martin-Luther Halle-Wittenberg Üniversitesi Fizik Enstitüsü'nden Prof. Dr. Roland Scheer'in PV Grubuna teşekkür ederler.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Semih AĞCA: Performing the experiments, analyzing the results, and writing the manuscript.

Deneylerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazılması.

Güven ÇANKAYA: Bringing the idea, supervising the study, and final check of the manuscript.

Fikrin geliştirilmesi, çalışmanın danışmanlığı ve makalenin son kontrolü.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Klaus J., Olindo I., Arno H., Van Swaaij R., Miro Z., (2014). Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems. Cambridge: UIT Cambridge.

[2] Kodigala S. R., (2011). Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ Based Thin Film Solar Cells. Massachusetts: Academic Press.

[3] Yuan S., Wang X., Zhao Y., Chang Q., Xu Z., Kong J., Wu S., Solution Processed Cu(In,Ga)(S,Se)₂ Solar Cells with 15.25% Efficiency by Surface Sulfurization, ACS Applied Energy Materials, 3 (2020) 6785-6792.

[4] Atasoy Y., Başol B., Olğar M., Tomakin M., Bacaksız E., Cu(In,Ga)(Se,Te)₂ Films Formed on Metal Foil Substrates by a Two-stage Process Employing Electrodeposition and Evaporation, Thin Solid Films, 649 (2018) 30-37.

[5] Atasoy Y., Başol B., Polat İ., Tomakin M., Parlak M., Bacaksız E., Cu(In,Ga)(Se,Te)₂ Pentenary Thin Films Formed by Reaction of Precursor Layers, Thin Solid Films, 592 (2015) 189-194.

[6] Fiat S., Polat I., Bacaksız E., Çankaya G., Koralli P., Manolakos D. E., Kompitsas M., Optical and Structural Properties of Nanostructured CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_(1-x)Te_x)₂ Chalcopyrite Thin Films - Effect of Stoichiometry and Annealing, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 14 (2014) 5002-5010.

[7] Varol S. F., Bacaksız E., Koralli P., Kompitsas M., Çankaya G., A Novel Nanostructured CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_{0.4}Te_{0.6})₂/SLG Multinary Compounds Thin Films: For Photovoltaic Applications, Materials Letters, 142 (2015) 273-276.

[8] Fiat S., Polat İ., Bacaksız E., Kompitsas M., Çankaya G., The Influence of Annealing

Temperature and Tellurium (Te) on Electrical and Dielectrical Properties of Al/p-CIGSeTe/Mo Schottky Diodes, Current Applied Physics, 13 (2013) 1112-1118.

[9] Karatay A., Küçüköz B., Çankaya G., Ates A., Elmali A., The Effect of Se/Te Ratio on Transient Absorption Behavior and Nonlinear Absorption Properties of CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_{1-x}Te_x)₂ (0 ≤ x ≤ 1) Amorphous Semiconductor Thin Films, Optical Materials, 73 (2017) 20-24.

[10] Lee T. D., Ebong A. U., A Review of Thin Film Solar Cell Technologies and Challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70 (2017) 1286-1297.

[11] Fiat S., Bacaksız E., Kompitsas M., Çankaya G., Temperature and Tellurium (Te) Dependence of Electrical Characterization and Surface Properties for a Chalcopyrite Structured Schottky Barrier Diode, Journal of Alloys and Compounds, 585 (2014) 178-184.

[12] Varol S. F., Bacaksız E., Çankaya G., Kompitsas M., Optical, Structural, and Morphological Characterization of CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_{0.6}Te_{0.4})₂ Thin Films under Different Annealing Temperatures, Celal Bayar University Journal of Science, 9 (2013) 9-16.

[13] Ağca S., Çankaya G., Sonmezoglu S., Impact of Tellurium as an Anion Dopant on the Photovoltaic Performance of Wide-bandgap Cu(In,Ga)Se₂ Thin-film Solar Cells with Rubidium Fluoride Post-deposition Treatment, Frontiers in Energy Research, 11 (2023) 1215712.

[14] Mise T., Nakada T., Microstructural and Optical Properties of CuIn₃Te₅ Thin Films for Solar Cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94 (2010) 1132-1136.

[15] Mise T., Nakada T., Low Temperature Growth and Properties of Cu-In-Te Based Thin Films for Narrow Bandgap Solar Cells, Thin Solid Films, 518 (2010) 5604-5609.

[16] Wei S. H., Zhang S. B., Zunger A., Effects of Ga Addition to CuInSe₂ on Its Electronic, Structural, and Defect Properties, Applied Physics Letters, 72 (1998) 3199-3201.

[17] Bulbul S., Ertugrul G., Arli F., Investigation of Usage Potentials of Global Energy Systems,

International Advanced Researches and Engineering Journal, 2 (2018) 58-67.

[18] Zhao C., Yu S., Tang W., Yuan X., Zhou H., Qi T., Zheng X., Ning D., Ma M., Zhu J., Zhang J., Yang C., Li W., Advances in CIGS Thin Film Solar Cells with Emphasis on the Alkali Element Post-Deposition Treatment, Materials Reports: Energy, 3 (2023) 100214.

[19] Cheung, S. K., Cheung N. W., Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics, Applied Physics Letters, 49 (1986) 85-87.

[20] Theys B., Klinkert T., Mollica F., Leite E., Donsanti F., Jubault M., Lincot D., Revisiting Schottky Barriers for CIGS Solar Cells: Electrical Characterization of the Al/Cu(InGa)Se₂ Contact, Physica Status Solidi A, 213 (2016) 2425-2430.

[21] Sönmezoğlu S., Şenkul S., Taş R., Çankaya G., Can M., Electrical Characteristics of an Organic Thin Copolymer/p-Si Schottky Barrier Diode, Thin Solid Films, 518 (2010) 4375-4379.

[22] Sönmezoğlu S., Şenkul S., Taş R., Çankaya G., Can M., Electrical and Interface State Density Properties of Polyaniline-poly-3-methyl Thiophene Blend/p-Si Schottky Barrier Diode, Solid State Sciences, 12 (2010) 706-711.

[23] Sönmezoğlu S., Durmuş C. B., Taş R., Çankaya G., Can M., Fabrication and Electrical Characterization of Pyrrole-aniline Copolymer-based Schottky Diodes, Semiconductor Science and Technology, 26 (2011) 055011.

[24] Akkiliç K., Türüt A., Çankaya G., Kiliçoğlu T., Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Cd/n-Si and Cd/p-Si Schottky Barrier Diodes, Solid State Communications, 125 (2003) 551-556.

[25] Çankaya G., Uçar N., Türüt A., An Investigation of I-V Characteristics of Au/n-GaAs Schottky Diodes after Hydrostatic Pressure, Physica Status Solidi A, 179 (2000) 469-473.

[26] Benghanem M. S., Alamri S. N., Modeling of Photovoltaic Module and Experimental Determination of Serial Resistance, Journal of Taibah University for Science, 2 (2009) 94-105.

[27] Keller J., Pearson P., Nilsson N. S., Stolt O., Stolt L., Edoff M., Performance Limitations of Wide-Gap (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ Thin-Film Solar Cells, Solar RRL, 2021 (2021) 2100403.

[28] Keller J., Sopiha K. V., Stolt O., Stolt L., Persson C., Scragg J. J. S., Törndahl T., Edoff M., Wide-gap (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ Solar Cells with Different Buffer Materials—A Path to a Better Heterojunction, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28 (2020) 237-250.

Measurement of the Cybersecurity Strategy Effectiveness with a Scorecard Based on Risk Analysis

Özlem EVRE^{1*} , Bünyamin CIYLAN² 

¹ Gazi University, Computer Forensics, Graduate School of Informatics, Ankara, Turkey

² Gazi University, Department of Computer Engineering, Technology Faculty, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/08/2023
Revision: 13/11/2023
Accepted: 30/11/2023

Keywords

National Cybersecurity
Strategy
Effectiveness of Strategy
Strategy Implementation
Model
Scorecard for
Cybersecurity Strategy
Measuring Cybersecurity
Strategy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/08/2023
Düzelme: 13/11/2023
Kabul: 30/11/2023

Anahtar Kelimeler

Ulusal Siber Güvenlik
Stratejisi
Stratejinin Etkinliği
Strateji Uygulama Modeli
Siber Güvenlik Stratejisi
Puan Kartı
Siber Güvenlik Stratejisini
Ölçme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this article, it is mentioned that a strategy model was prepared in order to eliminate the lack of strategy implementation, which is a global problem, and the prepared action plan was evaluated using the scorecard. A risk-based scorecard was created to develop an effective strategy and ensure its continuity. / Bu makalede küresel bir sorun olan strateji uygulama eksikliğinin giderilmesi amacıyla bir strateji modelinin hazırlandığı ve hazırlanan eylem planının puan kartı kullanılarak değerlendirildiğinden bahsedilmektedir. Etkin bir strateji geliştirmek ve sürekliliğini sağlamak amacıyla risk bazlı puan kartı oluşturulmuştur.



Figure A: Effective Strategy Development /Şekil A: Etkili Strateji Geliştirme

Highlights (Önemli noktalar)

- To create a living and self-renewing Information Security Ecosystem / Yaşayan ve kendini yenileyen bir Bilgi Güvenliği Ekosistemi oluşturmak.
- Increasing the effectiveness of the strategy / Stratejinin etkinliğini arttırmak
- Guiding the creation of a new strategy / Yeni bir strateji oluşturulmasına yol göstermek

Aim (Amaç): The aim is to emphasize that sustainability and continuous improvement will be increased by using the scorecard based on risk analysis by implementing the proposed action plan through the strategy model. / Önerilen eylem planının strateji modeli üzerinden hayata geçirilmesiyle risk analizine dayalı puan kartı kullanılarak sürdürülebilirliğin ve sürekli iyileştirmenin artırılacağı vurgulanması amaçlanmaktadır.

Originality (Özgünlük): This study suggests that measurement as a method of increasing productivity, which has not been discussed much until now, may be the solution. / Bu çalışma, bugüne kadar çok fazla tartışılmayan bir verimlilik artırma yöntemi olarak ölçümün çözüm olabileceğini öne sürüyor.

Results (Bulgular): Thanks to the scorecard, which will shed light on the extent to which the action plan headings have been fulfilled and will also provide information about auditing and reporting, which is the last stage of the strategy implementation model, the aspects of the strategies that are not working and the actions that need to be added or improved will be quickly revealed. / Eylem planı başlıklarının ne ölçüde yerine getirildiği konusunda ışık tutacak, aynı zamanda strateji uygulama modelinin son aşaması olan denetim ve raporlama konusunda da bilgi verecek olan puan kartı, sayesinde stratejilerin çalışmayan yönleri, eklenmesi veya geliştirilmesi gereken aksiyonlar hızla ortaya çıkacaktır.

Conclusion (Sonuç): While developing a national cybersecurity strategy or updating the existing strategy, attention should be paid to ensure that the strategy is effective, constantly evolving, and reinforcing weak points. A successful strategy must be fed with feedback, measured, and continuously improved. / Ulusal siber güvenlik stratejisi geliştirirken veya mevcut stratejiyi güncellerken stratejinin etkili olmasına, sürekli gelişmesine ve zayıf noktaları güçlendirmesine dikkat edilmelidir. Başarılı bir stratejinin geri bildirimlerle beslenmesi, ölçülmesi ve sürekli iyileştirilmesi gerekir.



Measurement of the Cybersecurity Strategy Effectiveness with a Scorecard Based on Risk Analysis

Özlem EVRE^{1*} , Bünyamin CİYLAN²

¹ Gazi University, Computer Forensics, Graduate School of Informatics, Ankara, Turkey

² Gazi University, Department of Computer Engineering, Technology Faculty, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/08/2023
Revision: 13/11/2023
Accepted: 30/11/2023

Keywords

National Cybersecurity
Strategy
Effectiveness of Strategy
Strategy Implementation
Model
Scorecard for
Cybersecurity Strategy
Measuring Cybersecurity
Strategy

Abstract

Although the rapid acceleration of technology offers solutions that will make human life easier, it also brings technological threats that will negatively affect human life and cause serious problems. Attacks, thefts, and espionage using technology increase exponentially yearly compared to the previous. To eliminate this problem that affects the whole world, many countries prioritize creating cybersecurity strategies to protect their information and resources and develop effective implementation methods. Despite the abundant literature, there is a significant gap in the effective implementation of strategies. While evaluating the strategy, measurement is made regardless of the risks arising if the action plan is not fulfilled. For this reason, it is recommended to assess the risk that will occur if the action titles are not implemented to eliminate this shortcoming. The aim is to emphasize that sustainability and continuous improvement will be increased by using the scorecard based on risk analysis by implementing the proposed action plan through the strategy model. The use of scorecards to overcome the increasing challenges arising from digital transformation today will contribute to evaluating the strategy, eliminating its shortcomings, and providing self-assessment. This study suggests that measuring as a method of increasing efficiency, which has not been discussed much until now, may be the solution. To ensure the security of the smart world, there is a need for a sustainable and effective strategy that can keep up with digital realities, renewing itself.

Siber Güvenlik Stratejisi Etkinliğinin Risk Analizine Dayalı Skor Kart ile Ölçülmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/08/2023
Düzeltilme: 13/11/2023
Kabul: 30/11/2023

Anahtar Kelimeler

Ulusal Siber Güvenlik
Stratejisi
Stratejinin Etkinliği
Strateji Uygulama Modeli
Siber Güvenlik Stratejisi
Puan Kartı
Siber Güvenlik Stratejisini
Ölçme

Öz

Teknolojinin hızla ivmelenmesi insan hayatını kolaylaştıracak çözümler sunsa da insan hayatını olumsuz etkileyecek ve ciddi sorunlara yol açacak teknolojik tehditleri de beraberinde getiriyor. Teknolojiyi kullanan saldırılar, hırsızlıklar ve casusluk olayları her yıl öncekine göre katlanarak artıyor. Tüm dünyayı etkileyen bu sorunu ortadan kaldırmak için birçok ülke, bilgi ve kaynaklarını korumaya yönelik siber güvenlik stratejileri oluşturmaya ve etkili uygulamaya yöntemleri geliştirmeye öncelik veriyor. Literatürün bolluğuna rağmen stratejilerin etkili bir şekilde uygulanması konusunda önemli bir boşluk bulunmaktadır. Strateji değerlendirilirken aksiyon planının yerine getirilmemesi durumunda ortaya çıkacak risklere bakılmaksızın ölçüm yapılır. Bu nedenle bu eksikliğin giderilmesine yönelik eylem başlıklarının hayata geçirilmemesi durumunda oluşacak riskin değerlendirilmesi önerilmektedir. Önerilen eylem planının strateji modeli üzerinden hayata geçirilmesiyle risk analizine dayalı puan kartı kullanılarak sürdürülebilirliğin ve sürekli iyileştirmenin artırılacağı vurgulanması amaçlanmaktadır. Günümüzde dijital dönüşümün getirdiği artan zorlukların üstesinden gelmek için puan kartlarının kullanılması, stratejinin değerlendirilmesine, eksikliklerinin giderilmesine ve öz değerlendirmenin sağlanmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, bugüne kadar pek fazla tartışılmayan, verimliliği artırma yöntemi olarak ölçmenin çözüm olabileceğini öne sürüyor. Akıllı dünyanın güvenliğinin sağlanması için dijital gerçekliğe ayak uydurabilen, kendini yenileyebilen, sürdürülebilir ve etkili bir stratejiye ihtiyaç var.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Cybersecurity is the protection of digital information and its infrastructure. Cybersecurity

addresses the challenges and threats of cyberspace to secure the benefits and opportunities of digital life [1]. Regarding cybersecurity and information security, it will not be enough to buy the latest

technology devices/systems, use anti-virus software, and update periodically. The point is that the weakest link is "human". Recent studies reveal that the greatest threat to an organization's information security is caused by careless corporate employees who deliberately or unintentionally misuse the organization's information assets [2]. Similarly, Mills et al. [3] emphasized in their study that insider threats are more harmful than external threats. At the same time, they mentioned that the damage they inflict can be more devastating because they are knowledgeable about issues such as the zero-day vulnerability of the hardware and software in the system, which external threats cannot have. For this reason, to ensure information security, it is necessary to increase the information security awareness of the managers and employees of the institution. To understand why raising awareness is important, mentioning the threats and risks is essential. The importance of cybersecurity and information security should be emphasized to protect personal and corporate interests. It is defined that each individual has roles and responsibilities in this regard; it should be demonstrated that individuals, institutions, and ultimately the state in general are interconnected.

Creating a cybersecurity strategy document and implementing it within the framework of an action plan is no longer just a technology-oriented security strategy. It is an international strategy that should be considered in a much more comprehensive range due to its unlimited application and scope. In Kovacs's [4] study, he mentioned that since the security of infrastructures based on information technologies, which exist in public services, economic life, public administration, defense sector, and even in the smallest detail of daily life, is of vital importance, if these systems do not work, society does not work either. At the same time, he stated that the importance of cyberspace should not be questioned in this case. For these reasons, he emphasized that the challenges and threats to cyberspace should be addressed at the strategic level. The national strategy has also become one of the critical points to be discussed in the country's defense. For these reasons, strategies and implementation methods should be developed and regularly updated to reduce risks and defend security against cybersecurity threats.

In this study, worldwide best practice examples (TR National Cybersecurity Strategy [5, 6], Singapore

Cybersecurity Strategy [7-10], and Estonia Cybersecurity Strategy [11-12]) are reviewed to create a successful national cybersecurity strategy and action plan. At the same time, guidelines from organizations such as the European Network and Information Security Agency (ENISA) [13], the North Atlantic Treaty Organization (NATO) [14], and the International Telecommunication Union (ITU) [15], which is the information and communication technologies institution affiliated to the United Nations were also evaluated.

Around the world, effectiveness and implementation problems are challenges in cybersecurity strategies. Strategies may be insufficient or incomplete due to technological innovations and developing cyberspace. For this reason, the research focused on increasing the strategy's effectiveness to find solutions to these problems. For this purpose, the country strategies and the directives of organizations such as ENISA, NATO, and ITU have been examined, and a data source has been created. The generated data source and action titles were decided Using good practice examples and guidelines as crucial milestones. Unlike other studies, it has been proposed to implement the action plan systematically over a strategy model that includes control and reporting. In addition, a risk analysis-based scorecard has been designed to provide continuous improvement for the audit and reporting part of this model. In the current studies to increase the strategy's effectiveness, trainings, conferences, public service announcements, etc., mentioned promotional and efficiency-enhancing practices, or in studies based on measurement, measurements such as awareness or risk analysis for the institution are made. In this study, unlike the existing studies, it is considered to measure the performance of the cybersecurity strategy as a solution to the effectiveness and implementation problems. Measuring risk analysis together with the asset inventory containing the action titles will help evaluate the situation and eliminate the deficiencies.

The remainder of the paper is organized as follows: Section 2 describes the country strategies reviewed and how the establishment guidelines were selected to generate the data source. Section 3 examines different studies on the national cybersecurity strategy. The strategy model that will increase the effectiveness of the action plan operation is suggested in Section 4. At the same time, managerial and technical actions are also described

in this section. In Section 5, the risk analysis-based scorecard can be used to develop or update strategies to tackle cybersecurity challenges internationally. In the last section, the contribution of this study is presented, and suggestions for improvements are given.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

As can be seen from the Effective Strategy Development flowchart in Figure 1, this study started by examining the strategy documents and action plans of the countries (United States, Germany, China, Denmark, Estonia, France, England, Qatar, Cyprus, Korea, Romania, Russia,

Singapore, and Turkey) that have strategy documents. In addition, the guidelines for strategy development and implementation by organizations such as ENISA, NATO, and ITU were also researched for their guiding nature. While the current strategy plans are essential for learning the latest methods and applications due to the developing technology, the first strategies created for the countries are crucial because they are the initial step. With the development of technology, the tools and applications used are also developing, changing, and updating at the same speed. Technological change can be observed very clearly in every field.

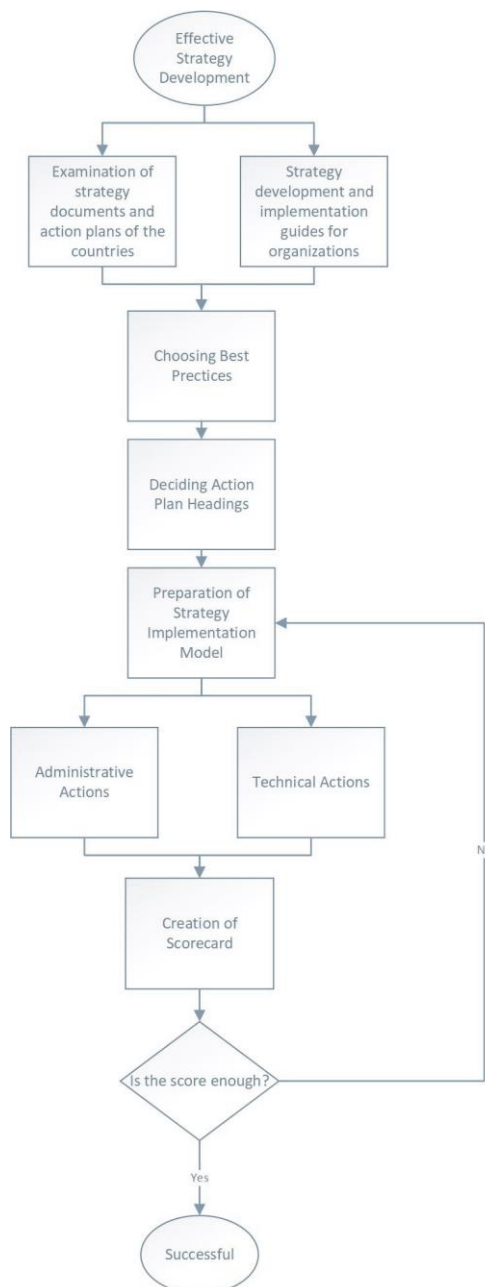


Figure 1. Effective Strategy Development Flowchart (Etkili Strateji Geliştirme Akış Şeması)

Creating a strategy action plan is a crucial step to achieving its purpose. The action plan is the plan to achieve the vision of the strategy. For this reason, creating a successful strategy depends on organizing a good action plan. Examining the best examples, understanding the action plans of successful countries, developing methods to keep their applicability at the highest level, and being aware of the latest developments are the keys to a successful strategy.

This study has two reasons for choosing the National Cybersecurity Strategies of Türkiye, America, England, Estonia, and Singapore as a guide. First, they are active and constantly renewed; second, they have a good score in the Global Cyber

Security Index [16-19], a reliable reference that measures global cybersecurity commitment.

Up-to-date data from all countries are available on the "National Cyber Security Index (NCSI)" website funded by the Estonian Ministry of Foreign Affairs. The NCSI is a global index that measures countries' preparedness to prevent cyber threats and manage cyber incidents. NCSI is a database of publicly available evidence materials and a national cybersecurity capacity-building tool. National cybersecurity information of 160 countries can be accessed through this map. The graphical representation of NCSI Achievement Percentage is divided into 12 sections, as shown in Figure 2. In addition, there is information such as that country's population, area, and per capita national income.



Figure 2. National Cyber Security Index (Türkiye) (Ulusal Siber Güvenlik Endeksi (Türkiye))

All updated versions of National cybersecurity information are also available on this site. Each strategy is evaluated in 3 areas: General Cyber Security Indicators, Basic Cyber Security Indicators, Incident and Crisis Management Indicators. At the same time, it is possible to compare these global indices, which measure countries' preparedness to prevent cyber threats and manage cyber incidents, through these indicators.

Both the European Union and NATO member states considered it necessary to take steps towards cybersecurity and prepared a strategy. In addition to the strategies created by the European Union member states or NATO with cybersecurity strategies, organizations such as ENISA, NATO, and ITU also draw attention with their studies in this field.

ENISA has done a lot of work on the development and implementation of national cybersecurity

strategies and has also published guidelines. It supports member states. On its web page, the strategies of the member countries are shown on an interactive map.

NATO has developed a policy and action plan approved by its allies. It regards cyber defense as the main task of the alliance. It enables further development of policy through activities such as awareness, training, and exercises among allied countries. It also undertakes information sharing, cooperation, and mutual assistance among member states.

ITU provides guidance on how countries can develop their strategies or support existing practices to make the digital environment more secure in their prepared ITU application guide.

As a result of the good practice examples and guides examined, "Action Plan Headings" for the targets of

the National Cybersecurity Strategy were decided. To increase the applicability of the action plan titles, the actions are divided into two administratively and technically, and it is recommended to act according to the prepared strategy implementation model. At the same time, a scorecard was created to measure the strategy's effectiveness to be used in the strategy implementation model, audit, and reporting area.

2. NATIONAL CYBERSECURITY STRATEGY (ULUSAL SİBER GÜVENLİK STRATEJİSİ)

When creating a cybersecurity strategy and its action plan, one of the first questions that comes to mind is why a national plan should be made, not a single strategy valid for all countries. There are already standards for information security, like ISO 27001, around the world. However, the way of implementation and approach of each country may differ. As Kovacs [4] puts it, "National cybersecurity strategies, whether made by big powers or small countries, have different answers to the challenges of cyberspace." For this reason, each country should develop its strategy according to its structure, capabilities, and awareness level.

There are different explanations for why a national cybersecurity strategy is needed. One of the best descriptors has been made by Haddad and Binder [20]. According to them, new cybersecurity regimes are required to protect them from the risks and threats that may occur as society is increasingly intertwined with digital technology. At the same time, they talk about the vision of the future and the problems arising from new threats and insecurities as a significant challenge in digitalization and become the government's responsibility. As they mentioned, digitalization is intertwined with society. "National Cybersecurity Strategies" are needed to adapt and trust digital technology, to be protected from risks and threats, and to create a defense mechanism against external threats.

In the literature review, the most striking studies are the comparative studies using the guideline documents prepared by ENISA, NATO, and ITU. For example, in his research, Karatas [21] compared the cybersecurity strategies of Turkey, the United States of America, and the United Kingdom by using the headings in the cybersecurity strategy preparation guides put forward by the European Union Network and Information Security Agency (ENISA) and the International Telecommunication Union (ITU). He mentioned that although the USA is one of the strongest countries regarding systems and infrastructure against cyber threats, the

implemented programs, systems, and infrastructures still need to be improved against today's dangers.

In his study, Stitilis [22] compared the cybersecurity policies of the EU and NATO countries. They pointed out that the EU and NATO cybersecurity strategic documents differ in scope and emphasis. They mentioned that all strategies are different and that it is too early to create a unified national cybersecurity strategy model (a single document) applicable to all countries.

Göçoğlu and Aydın [23] examined the official cybersecurity policies of the USA, Russia, and China and made a comparative analysis. They also mentioned in this study the importance of determining roles within the framework of Haddad and Binder's [20] security policies. In addition, according to the International Telecommunication Union, the cybersecurity ratings of these three countries are given. It is mentioned that by producing its information technology, China is avoiding the hegemony of the leading countries in the sector and aims to maintain its national sovereignty. They noted that the steps the USA, Russia, and China took for a solid and successful cybersecurity policy spanned 20 years. They also said that Turkey can be successful in this area by taking important steps with rapid structural reforms and appropriate policies.

In the study by Egas et al. [24], Ecuador, a developing country, was chosen as a case study, and ENISA and ITU were taken as the basis for this review. Considering the characteristics of developing countries, they conducted a study investigating whether it would be possible to detail a proposal for a national cybersecurity document that serves as a guide and includes current good practices. In the study, it has been mentioned that the fight against cyber threats is dealt with within the framework of existing tools and capacities in combating these threats. However, the situation is similar for developed or developing countries due to their transnational nature. He also stressed that developing the capacity and skills to locally, efficiently, and effectively manage the growing number of cybersecurity-related incidents affecting the country's progress is vital. In this respect, university interventions should be a pillar to ensure technological autonomy through education, research, and innovation.

In his doctoral thesis, Al-Hamar [25] conducted research to improve the information security processes of Qatari organizations by developing a

comprehensive Information Security Management framework applicable to the implementation of the National Information Assurance (NIA) policy, taking into account the culture and environment of Qatar. Many literature reviews, surveys, interviews, and similar studies have been carried out to achieve the research purpose. In this research, the lack of security culture, lack of awareness, lack of trained personnel in information security, and the existing obstacles in the current system that need to be addressed are mentioned.

The doctoral study by Alarifi [26] examined the assessment and mitigation of information security risk in Saudi Arabia. This thesis has studied the information security awareness level among the public and the information security practices among the IT departments of organizations in Saudi Arabia. According to the results of online surveys, a new information security model has been developed, and it has been stated that this new model will protect and improve the awareness and practice of information security in Saudi Arabia in the short and long term.

In his doctoral thesis, "An Experimental Study on Information Security Policies, Information Technology Management and International Standardization Security Certification Organization" by Paarlberg [27] investigated the benefits of developing and maintaining an information security policy for an organization and whether this benefit is measurable. Izycki and Colli [28] mention that among the 86 strategies they reviewed, 58 countries listed the protection of critical infrastructures as one of the cybersecurity goals at the national level, and a comparative analysis between strategies mentions that the safety of their critical infrastructure is the third most frequent strategic goal. Pavlon [29] mentioned in his study that evaluating and understanding the organization's security culture can lead to an understanding of how security effectiveness can be maintained and to identify security vulnerabilities that can lead to downtime or cause failure. Therefore, he mentioned that approaches to developing a security culture will lead to an increase in trust and a decrease in cyberattacks and their effects. Darıcı [30] examined Turkey's "National Cybersecurity Strategy and Action Plan" in his study titled "Analysis of Turkey's Cybersecurity Policies". It compared the 2013-2014 National Cybersecurity Strategy and Action Plan [5] with the 2016-2019 National Cybersecurity Strategy and Action Plan [6]. He mentioned that the two strategies are compatible, but the second strategic planning is simpler and more general. He especially

said that more emphasis is placed on developing national software and technologies. At the end of the study, it was especially emphasized that there is an awareness in the state administration of Turkey about developing the country's cybersecurity strategy and investing in cyber defense and attack capacity, but these steps should be designed further.

One of the reasons the strategies are inefficient is the lack of institutional structure and the lack of or incomplete distribution of responsibilities. Haddad and Binder [20] mention that duties are not distributed, and there needs to be an institutional structure in the Information and Communication Security Strategy, which was first prepared in their study in Austria. To overcome these problems, they stated that a framework with different duties and responsibilities has been established in the next Austrian Cybersecurity Strategy. In the same study, they mention two critical programs in the Austrian security research sector to maintain digital security and security through R&D. These are the ministry-funded security research program KIRAS and the Austrian Security Research (Horizon 2020). Several programs have been launched in Austria to increase digital awareness and practical knowledge. These include assistance for Small and Medium Enterprises, financing schemes to improve digital structures, and training courses to transform unskilled citizens and the workforce into digitally viable and prudent issues [20]. In the Austrian policy vision, creating digitally conscious and sensitive issues is not only a matter of vocational training and continuing skills development. Still, it should also be diffused into the education system. With these efforts, besides having the ability to reduce risks and respond appropriately to threats, it also helped to train qualified personnel. As a result of all these, according to Haddad and Binder, the number of cybersecurity experts in Austria is expected to increase. It aims to increase resilience by creating practical expertise through simulated events and exercises to upgrade digital safety and security.

Countries have different approaches when designing and developing the National Cybersecurity Strategy. While some of them mentioned these approaches in the action plan, some did not make any explanation about it. Santisteban et al. [31] have analyzed the National Cybersecurity Strategies and divided the development of a strategy into 5 phases: Initiation, Inventory and Analysis, Production, Execution, Monitoring, and Evaluation.

3. NATIONAL CYBERSECURITY STRATEGY ACTION PLAN (ULUSAL SİBER GÜVENLİK STRATEJİSİ EYLEM PLANI)

The action titles that must be among the guidelines and the country strategies examined were decided according to the number of

countries using these titles and the explanations in the guides or strategies. While developing the national cybersecurity strategy, it is essential to include the topics listed in Table 1 within the action headings, even if they are outside the target headings for the strategy to succeed.

Table 1. National Cybersecurity Strategy Goals (Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi Hedefleri)

Action Headlines	Countries	Number of Countries
Risk Analysis of Critical Infrastructure	USA, Germany, Estonia, Southern Cyprus, Singapore, Romania, Turkey	8
Protecting Critical Infrastructure	USA, Germany, China, Denmark, Estonia, Southern Cyprus, England, Qatar, Romania, Singapore, Turkey	11
Legislation	China, Germany, Estonia, England, Qatar, Romania, Singapore, Turkey, Southern Cyprus	10
Fighting Cybercrime	USA, Germany, China, Denmark, Estonia, France, Cyprus, England, Qatar, Korea, Romania, Singapore, Turkey	13
Public-Private sector cooperation	USA, Germany, Estonia, Denmark, Southern Cyprus, England, Qatar, Korea, Romania, Singapore, Turkey	12
International Cooperation	USA, Germany, China, Denmark, Estonia, France, UK, Korea, Romania, Singapore	10
Awareness	USA, Germany, China, Denmark, Estonia, France, Cyprus, Qatar, Romania, Singapore, Turkey	11
Research & Development	Denmark, Estonia, Southern Cyprus, England, Qatar, Romania, Singapore, Turkey	9
Drill	Denmark, Cyprus, Qatar, Singapore, Türkiye	5

Having a good security strategy or implementing a good strategy first passes through learning, assimilation, and culturally appropriate examples of good practice around the world. While choosing good practice examples, looking at the updated years of the strategies and the strategy titles that should be in the strategy is necessary. In this study, three countries were selected as good practice practices. First, Turkey was chosen because it updates its strategies regularly and has a strategy that covers the current time. Secondly, Estonia has been chosen because it is effectively implemented, has been intertwined with cybersecurity for a long time, constantly updates itself, and is a pioneer in this field. The third country, Singapore, was chosen because of its master plans that support the strategy plan it prepares for each new year (2018, 2020, 2021) and the technology it follows to increase awareness and applicability. Because cybersecurity is a formation intertwined with technology, current strategy plans are essential.

For the National Cybersecurity Strategy to be put into practice, it is necessary to follow the developments in the field of cybersecurity, take into account the technological situation of the country, and act with a well-prepared action plan without

ignoring threats and risks. In the action plan, the case should be evaluated, assets and risks should be determined, necessary mechanisms should be established to protect assets and manage risks, and the action plan should be followed and coordinated.

The mission and vision of the National Cybersecurity Strategy should be understood and implemented starting from the highest levels of the state. Thus, the importance given to strategy as a country will be better understood, and its applicability will increase simultaneously. One of the critical aspects of the development and successful implementation of the National Cybersecurity Strategy Paper is collaboration between stakeholders. Al-Ghamdi [32] mentions in his study that identifying and involving all relevant stakeholders in developing and successfully implementing the National Cybersecurity Strategy is essential. However, daunting tasks and understanding stakeholder needs and their unique knowledge and expertise will facilitate collaboration toward achieving the strategy's objectives. It also emphasizes that monetary and social incentives will increase the implementation of the strategy. American Public Policy Research Institute researcher Tews [33] held a "web event on

whether the United States needs a national cybersecurity strategy." His web blog included critical evaluations of Jim Dempsey, Jim Lewis, Sujit Raman, and Diane Rinaldo that stood out from this event. Diane Rinaldo, one of the debaters, said that the legislation alone is not sufficient and that there is no single way to progress in the field of national cybersecurity; she wrote that at the end of the day, it's essential to have all voices in the hall to help ensure the best legislation moves forward. In the same discussion panel, Jim Lewis said that deterrence is critical for national cybersecurity, but it often doesn't work. The reason for non-operation is that there is no legally binding and international cooperation to be feared. For this, he mentioned that the norms will regularize cyber operations by

placing them under the umbrella of international law or humanitarian law and that deterrence can be ensured through accountability. Jacuch [34], in his study comparing Polish and selected country strategies, mentions that most countries emphasize the need for the government to cooperate with the private sector and the academic community. When the studies on creating, taking action, updating, or comparing different strategies are examined, it is understood that it should be in an easily applicable and measurable planning. In this study, a model was created to meet this need, as shown in Figure 3.

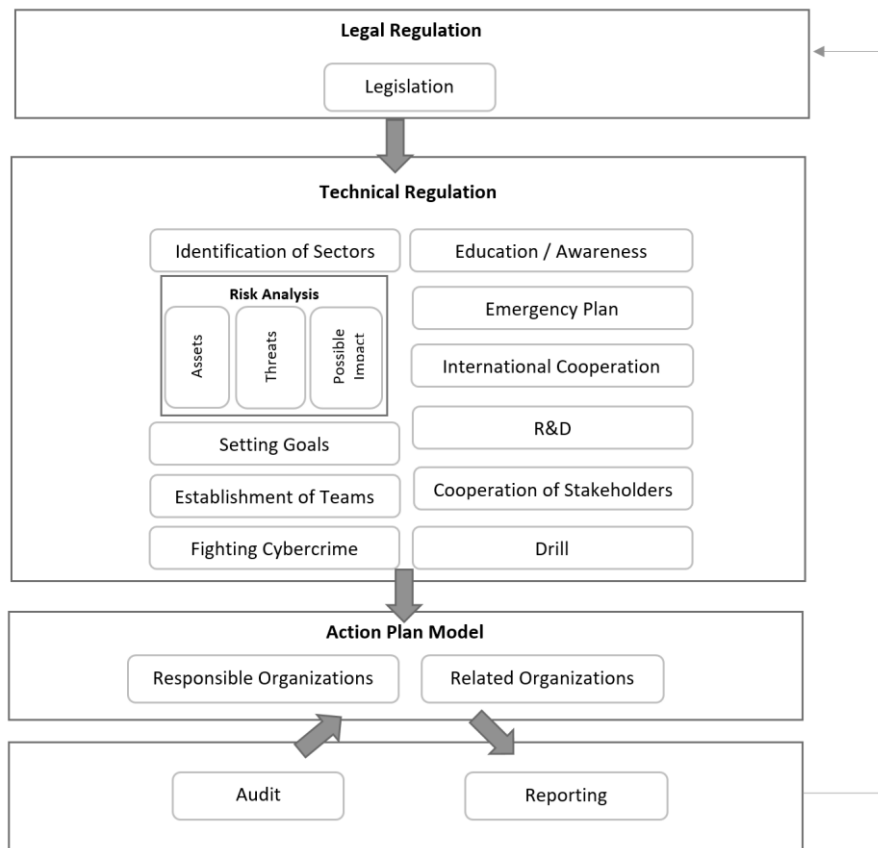


Figure 3. Strategy Implementation Model Recommendation (Strateji Uygulama Modeli Önerisi)

While creating this model, the PDCA model [35], one of the well-known dynamic models used for the continuous improvement of processes, was taken as an example. The PDCA (Plan-Do-Check-Act) model is a systematic way of managing quality and continuously provides steps to improve processes, as seen in Figure 4. Media can be the simplest example of why continuous improvement is necessary. As the popularity of new media

increases, many companies are shifting their advertising budgets from traditional media to areas such as social media [36]. For example, while public service announcements broadcast on television were a vital communication method in the past, it has become more critical to broadcast public service announcements over social media, organize digital competitions, and prepare digital campaigns to communicate using technology.

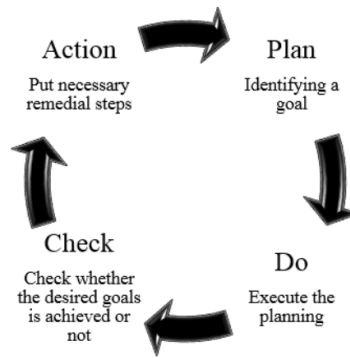


Figure 4. Strategy Implementation Model Recommendation (Strateji Uygulama Modeli Önerisi)

Adhering to the model proposed in this study can increase both ease of application and efficiency. In addition, with the audit and reporting section in the strategy action plan, targets and action titles can be measured, and a self-monitoring and improving structure can be provided.

In the cybersecurity strategy action plan, there are technical actions as well as administrative formations. In this study, we consider the action plan in 2 parts, Administrative and Technical Actions, to ensure national cybersecurity, increase its applicability, raise awareness, and ensure the strategy can work.

3.1. Administrative Actions (İdari Eylemler)

To ensure the functionality of the technical actions, the administrative structure must first be established and made operational among the steps to be taken in the action plan. Implementing the action plan requires identifying stakeholders, establishing legal regulations, establishing incident response teams, and especially establishing a Cybersecurity Board that will coordinate the entire structure. Administrative actions can be listed as follows:

- **Legislation:** One of the cornerstones of the creation and execution of the strategy, and even the most important, is to be supported by a legal framework.
- **Identifying Stakeholders:** To have an effective and successful strategy and increase the action plan's applicability, it is crucial to identify and include the stakeholders at every stage.

Establishment of Incident Response Teams: In cybersecurity breaches, early detection of incidents, rapid intervention, and reactivation of working systems will keep the damage to a minimum.

3.2. Technical Actions (Teknik Eylemler)

With the implementation of administrative actions, the necessary organizational structure is created for the action plan to function. After the institution

responsible for the strategy decides how the structure will be hierarchically from top to bottom and how it will act, the actions that need to be taken from a technical point of view start to be taken.

- **Identification of Sectors and Services:** It is necessary to determine the sectors and services that use the cyber world, provide services in this field, or use the service. To be protected from threats in the cyber world, it is necessary to answer the questions of what are online services, who are the organizations or private sectors that provide these services, and in which area the service is provided. In addition, the responsible institution for each sector should be determined.
- **Risk analysis:** After identification, the assets need to be listed. The size of the risk should be scaled, taking into account the threats to the assets and the existing vulnerabilities. The more assets there are, the more threats can be encountered, so the more vulnerable you are, the greater the risk. One of the critical points is dealing with the unknown. Therefore, it is crucial to protect assets based on what is known. The protection of critical infrastructure should be given priority when performing risk analysis. The study by Izyck and Colli [28], which analyzes and compares national cybersecurity strategies in terms of similarities shown in the scope of protection of critical infrastructures, divides the definition of critical infrastructures into two parts. The first is "Services and facilities (infrastructure) used by the community," and the second is "Infrastructures, the disruption or failure of which can be considered critical with adverse consequences to the public." is in the form.
- **Setting Goals:** The cybersecurity strategy should have objectives supported by the

action plan, considering technological developments and cybersecurity threats.

- **Emergency Plan:** Emergency plans should be prepared against cyber threats, even necessary mechanisms should be established, and checks should be made whether the system is working.
- **Fighting Cybercrime:** Technological events are changing almost every minute; developing and new technologies are included in our lives. However, cybercrime, a new type of crime, also changes with technology, develops and new ones emerge. Since cybercrimes have a different structure from known crimes and do not require physical contact, the current legal system is insufficient to punish these crimes.
- **Awareness Training:** The most essential factor in personal or corporate information breach incidents is employees' lack of awareness about security. As mentioned before, starting from the fact that the weakest link is human, the first step of the studies to be carried out in the field of cybersecurity should be training and awareness studies.
- **Information Sharing and Reporting:** To take cybersecurity protection to the next level, information sharing should be ensured in both national and international collaborations. All incidents must be accurately collected, reported, and shared among stakeholders. The more information is shared and informed on technological developments, threats, incidents, or losses, the more protection will increase.
- **Research & Development:** To have a good place in cybersecurity depends on following and developing innovations in this field and even creating and using their national technologies. Also, the private sector should be encouraged to work in this field, and even resources should be provided if possible.
- **International Cooperation:** Since the cyber world is a borderless medium, understanding the threats, finding the criminal, or reaching the source of the crime, especially in the fight against cybercrime, will be more successful with international cooperation. In addition, technological developments differ from country to country. Being aware of the changes and approaches in different countries will add value to each country's cybersecurity field.

- **Drill:** It is one of the inevitable actions to organize drills in specific periods to be able to fight cybercrime, be ready in emergencies, and react quickly. The drill is an application that measures readiness for actual attacks. Chatchalermpun and Daengsi [38], in their article "Raising cybersecurity awareness using phishing attack simulation," demonstrated that cyber drills and cybersecurity knowledge sharing can increase cybersecurity awareness in a financial institution, a targeted industry for attackers. They mentioned that thanks to the understanding gained, risks or threats can be reduced, and the possibility of timely intervention can be increased.

4. SCORECARD BASED ON RISK ANALYSIS (RİSK ANALİZİNE DAYALI PUAN KARTI)

ENISA has created the National Cybersecurity Strategies Assessment Tool (ENISA) [39] to help member states evaluate their strategic priorities and objectives regarding their National Cybersecurity Strategies. With this tool, the cybersecurity priorities of the countries are selected. Then, by answering a few simple questions (with YES or NO), ideas and advice can be sought, and improvements can be made. In this tool created by ENISA, there are 15 targets and different numbers of questions that test each target. Some of the targets are listed as "Develop contingency plans," "Protect critical infrastructure," "Organize drills," "Create reporting mechanisms," "Increase user awareness," "Encourage R&D" and "Strengthening training."

Shabe et al. [40] discussed a scorecard approach to present the results of measures of cybersecurity awareness levels among mobile phone users. They noted that scorecards should be used to research cybersecurity issues in other areas in South Africa. They also emphasized that the scorecard could serve as a guide for planning future campaigns to address gaps in awareness of cybersecurity issues. In his blog post, Null [41] mentioned that Dun & Bradstreet Corporation, an American company that provides business data, analytics, and insights, has even added a Cyber Risk Rating product to their business information offerings. He also mentioned that "Existing and Planned Control" and "Value of Assets" must be within the scope of the evaluation while creating the risk score. Venkataraman [42], in his article titled "The Importance of Measuring

Security Awareness" for Forbes magazine, mentioned that by spending time and effort to measure the success of security awareness practices and sharing this information, a better understanding and appreciation of the security role of the organization could be achieved. He also emphasized in the last word that "Great programs will only succeed thanks to analytics, insights, and actionable data." Jazri et al. [43] proposed a measure index of this cybersecurity goodness by analyzing the vital signs of critical organizations, taking into account the 114 vital signs recommended by the ISO/IEC 27001 standard.

Considering that technology changes every moment during the creation or implementation of the strategy, it needs to be continuously improved. Research has been conducted on different ways and methods to design, develop, and effectively implement the National Cybersecurity Strategy. In some studies, it was emphasized that the effectiveness of awareness training would be increased, while in some studies, it was mentioned that the deterrence or defense aspect should be strengthened. However, the difficulty of implementing the cybersecurity strategy, a global problem increasing exponentially with each passing day, still needs to be solved. To close this gap in the

literature, the Audit and Reporting sections of the Strategy Implementation Model proposed in this article are considered.

As in creating the Strategy Implementation Model proposal, the PDCA model was taken as an example to support the continuous improvement of the processes, and a scorecard was designed to be used in the audit section. While creating this scorecard, ENISA's assessment tool was taken as a basis. In the international ISO 27001 standard, which specifies the requirements for establishing, implementing, maintaining, and continuously improving an information security management system, the items specified explicitly in the information security risk assessment section were also used. Some of the things used in the scorecard are to define information security risks, identify risk owners, etc., listed in this standard's information security risk assessment process. Also, to provide improvement, it was started from being able to show mathematically whether a security policy works or not. To evaluate at this stage, it is necessary to find an answer to the question of what should be measured. At this point, fundamental performance indicators were selected by considering the risk levels determined due to the risk analysis and the implementation of the action titles in the action plan.

Table 2. Scorecard (Puan kartı)

Actions	Risk Degree	Fulfilling Action Titles	Responsible Institution		Periodic Evaluation	Total
			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No		
Cybersecurity Board	Middle (12-15)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	86,7
Legislation	Low (6-10)					90,0
Cyber Crime	Very low (1-5)	No	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	
Laws, regulations	Middle (12-15)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	
Cooperation of Stakeholders	Very low (1-5)					100,0
Identifying Stakeholders	Very low (1-5)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	
Public-Private sector cooperation	Very low (1-5)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	
Identification of Sector Services	High (16-20)					85,0
Critical Infrastructures Identification	High (16-20)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	
Critical Infrastructure Responsible	Middle (12-15)	Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	Yes	

The indicators in the scorecard shown in Table 2 were created using the strategy implementation model. Each indicator is scored separately and according to different weights. Key Performance Indicators (KPIs) and their weights are as follows:

- Risk Degree: 20%
- Fulfilling Action Titles: 40%
- Responsible Institution: 20%
- Periodic Evaluation: 20%

In Key Performance Indicators, risk grade is calculated by probability and severity of impact. The action titles are fulfilled by a single Yes or No question for each action. The Yes or No questions evaluate whether the action titles have a Responsible Institution. For the periodic evaluation, a period must be determined before scoring, and whether the monitoring is done according to that period is also measured with Yes or No questions. Fulfilling the action titles is directly linked to the strategy. Action titles can be fulfilled without a responsible institution, periodic evaluation, or risk analysis. Therefore, fulfillment of action titles has a higher percentage than other indicators. Risk Level, Responsible Institution, and Periodic Evaluation indicators have equal percentages.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Although the examined countries have national cybersecurity strategies, they are still exposed to cyber-attacks. When the existing strategies are discussed, it is revealed that the action plan prepared for the strategy's success needs to be fully complied with or implemented effectively. Some countries offer efficiency-enhancing plans yearly without waiting for the strategy life cycle.

To prepare an effective national cybersecurity strategy, first of all, field research should be done well. Assets and services related to technology must be identified, and risk analysis must be made. The action plan should be divided into two managerial and technical actions, considering the strategy implementation model, and should be implemented gradually. In addition, auditing and reporting should be done as suggested in the strategy implementation model, and a scorecard should be used to measure the strategy's success and ensure its sustainability.

In this article, it is mentioned for the first time that the strategy model was prepared to eliminate the lack of strategy implementation and the evaluation of the prepared action plan using the scorecard. Thanks to the proposed strategy implementation model, the stages of cybersecurity strategy formation will develop in a correct plan and hierarchically from top to bottom. The proposed strategy implementation model will assist in

developing the cybersecurity strategy in an accurate plan and hierarchically from top to bottom. The scorecard, which will shed light on the extent to which the action plan titles have been fulfilled and will also provide information on auditing and reporting, which is the last stage of the strategy implementation model, may also help other countries. The non-working aspects of the strategies and the actions that need to be added or developed will quickly emerge. In addition, the information obtained with the guides and good practice examples examined in this study will also help countries that want to build a strategy. Using the risk analysis recommended for information resources in the standard of establishment, implementation, maintenance, and continuous improvement of the information security management system (ISO 27001) as a part of this study will increase its effectiveness and ensure its sustainability.

In current studies, promotion and productivity-enhancing practices such as training, conferences, and public service announcements are mentioned to increase the strategy's effectiveness. In one of the existing metrics-based studies, cybersecurity awareness among phone users was measured using a scorecard. Only the specified titles were given points in the study. Another study mentioned the importance of conducting risk analysis only for the institution. In a study aimed at measuring awareness, the importance of noticing the attack, avoiding the attack, or measuring the number of reactions to the threat was mentioned. In another study to measure the goodness of cybersecurity, measurement was made using the fundamental variables of ISO 27001. In this study, unlike the existing studies, measuring the performance of the cybersecurity strategy is seen as a solution to the productivity and implementation problems. Making an inventory of assets will help determine the security areas that need to be protected and increase security. In addition, creating scores using risk analysis will increase the reliability of the measurements. Identifying assets, seeing risk, and identifying gaps will help approach a more secure system. A limited number of countries is seen as a limitation in this study. The study can be improved by selecting more countries. The strategy's action plan can be updated in the future by using the information obtained from the breaches and data losses. By creating a technological system and collecting data, the strategy can be improved, and its effectiveness can be increased simultaneously.

As a result, while developing a national cybersecurity strategy or updating the existing strategy, attention should be paid to ensure that the

strategy is effective, constantly evolving, and reinforcing weak points. A successful strategy must be fed with feedback, measured, and continuously improved.

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)

Özlem EVRE: She did the conceptualization, formal analysis, and writing. Kavramsallaştırmayı, biçimsel analizi ve yazma işlemini yaptı.

Bünyamin CİYLAN: He did the conceptualization, review and supervision. Kavramsallaştırmayı, incelemeyi ve denetlemeyi yaptı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Tsaruk O, Korniiets M. Hybrid nature of modern threats for cybersecurity and information security. Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal. 2020; 4(1): 57-78.
- [2] Flowerday S, Tuyikeze T. Information security policy development and implementation: The what, how and who. Computers & Security. 2016; 61: 169-183.
- [3] Mills J, Stuban SMF, Dever, J. Predict insider threats using human behaviors. IEEE Engineering Management Review. 2017; 45(1): 39-48.
- [4] Kovacs L. National cybersecurity strategy framework. Academic and Applied Research in Military and Public Management Science. 2019: 18(2).
- [5] TR Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications. National cyber security strategy and 2013-2014 action plan. 2013. Available online: <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/2-1-strateji-eylem-planlari-2013-2014-5a3412cf8f45a.pdf> (accessed on 12 June 2023).
- [6] TR Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications. 2016-2019 national cyber security strategy. 2016. Available online: <https://hgm.uab.gov.tr/uploads/pages/strateji-eylem-planlari/2016-2019guvenlik.pdf> <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/2-1-strateji-eylem-planlari-2013-2014-5a3412cf8f45a.pdf> (accessed on 12 June 2023).
- [7] Cyber Security Agency of Singapore. Singapore's cybersecurity strategy. 2016. Available online: <https://www.csa.gov.sg/Tips-Resource/publications/2016/Singapore-Cybersecurity-Strategy> (accessed on 12 June 2023).
- [8] Cyber Security Agency of Singapore. Singapore's safer cyberspace masterplan. 2020. Available online: <https://www.csa.gov.sg/Tips-Resource/publications/2020/safer-cyberspace-masterplan> (accessed on 12 June 2023).
- [9] Cyber Security Agency of Singapore. Singapore cyber safety handbook. 2020. Available online: https://www.csa.gov.sg/docs/default-source/csa/documents/publications/cyber-safety-activity-book-and-handbook/cyber-safety-handbook.pdf?sfvrsn=7ddf002f_0 (accessed on 12 June 2023).
- [10] Cyber Security Agency of Singapore. The singapore cybersecurity strategy. 2021. Available online: https://www.csa.gov.sg/docs/default-source/csa/documents/publications/the-singapore-cybersecurity-strategy-2021.pdf?sfvrsn=809ced95_0 (accessed on 12 June 2023).
- [11] Republic of Estonia. Cybersecurity strategy. 2019. Available online: <https://www.mkm.ee/media/703/download> (accessed on 12 June 2023).
- [12] Republic of Estonia. Cybersecurity strategy in Estonia. 2021. Available online: <https://www.ria.ee/media/1494/download> (accessed on 12 June 2023).
- [13] The European Network and Information Security Agency (ENISA). National cyber security strategies practical guide on development and execution. 2012. Available online: <https://www.enisa.europa.eu/publications/national-cyber-security-strategies-an-implementation-guide> (accessed on 12 June 2023).

- [14] NATO Cooperative Cyber Defense Centre of Excellence. National cyber security framework manual. 2012. Available online: https://ccdc.org/uploads/2018/10/NCSFM_0.pdf (accessed on 12 June 2023).
- [15] International Telecommunication Union (ITU). Guide to developing a national cybersecurity strategy. 2018. Available online: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/str/D-STR-CYB_GUIDE.01-2018-PDF-E.pdf (accessed on 12 June 2023).
- [16] International Telecommunication Union (ITU). Global cybersecurity index. 2014. Available online: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Pages/global-cybersecurity-index.aspx> (accessed on 12 June 2023).
- [17] International Telecommunication Union (ITU). Global cybersecurity index. 2017. Available online: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Pages/global-cybersecurity-index.aspx> (accessed on 12 June 2023).
- [18] International Telecommunication Union (ITU). Global cybersecurity index. 2018. Available online: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Pages/global-cybersecurity-index.aspx> (accessed on 12 June 2023).
- [19] International Telecommunication Union (ITU). Global cybersecurity index. 2020. Available online: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Pages/global-cybersecurity-index.aspx> (accessed on 12 June 2023).
- [20] Haddad C, Binder C. Governing through cybersecurity: National policy strategies, globalized (in-) security and sociotechnical visions of the digital society. *Österreichische Zeitschrift für Soziologie*, 2019; 44(1):115-134.
- [21] Karatas A. The comparative analysis of national cyber security policies: United States, United Kingdom and Turkey examples. *Journal of Academic Social Resources*, 2020; 5(19): 737-751.
- [22] Stitilis D, Pakutinskas P, Malinauskaitė I. EU and NATO cybersecurity strategies and national cyber security strategies: A comparative analysis. *Security Journal*. 2017; 30(4): 1151–1168.
- [23] Göçoğlu V, Aydın MD. Cybersecurity Policy: A comparative analysis of the USA, Russia, and China. *Journal of Security Sciences*. 2019; 8(2): 229-252.
- [24] Egas MR, Ninahualpa G, Molina D, Ron M, Ninahualpa G, Díaz J. National cybersecurity strategy for developing countries: Case study: Ecuador proposal. In proceedings of the 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Sevilla, Spain. 24-27 June 2020.
- [25] Al-Hamar A. Enhancing information security process in organisations in Qatar. PhD Thesis, Loughborough University, England, 25 June 2018.
- [26] Alarifi AS. Assessing and mitigating information security risk in Saudi Arabia. PhD Thesis, University of Wollongong, Australia, 2013.
- [27] Paarlberg JW. An empirical analysis on the effectiveness of information security policies, information technology governance, and international organization for standardization security certification. PhD Thesis, Capella University, United States, 2016.
- [28] Izycki E, Colli R. Protection of critical infrastructure in national cyber security strategies, european conference on cyber warfare and security. In proceedings of the 18th European Conference on Cyber Warfare and Security – ECCWS, Coimbra, Portugal, 4-5 July 2019.
- [29] Pavlova E. Enhancing the organisational culture related to cyber security during the university digital transformation. *Information & Security*. 2020; 46(3): 239-249.
- [30] Darıçlı AB. Analysis of Turkey's cyber security policies; Turkey's potential cyber security strategy. *Turkish Journal of TESAM Academy*. 2019; 6(2): 11-33.
- [31] Santisteban A, Cunyarachi LO, Andrade-Arenas L. Analysis of national cybersecurity strategies. (IJACSA) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020; 11(12): 771-779.
- [32] Al-Ghamdi M. Guide to developing a national cyber security strategy. *Materials Today: Proceedings*. 2021.
- [33] Tews S. Does the US need a national cybersecurity strategy? 2021. Available online: <https://www.aei.org/events/does-the-us-need-a-national-cybersecurity-strategy/> (accessed on 12 June 2023).
- [34] Jacuch A. Comparative analysis of cybersecurity strategies. *European Union Strategy and Policies. Polish and Selected Countries Strategies*. *Online Journal Modelling the New Europe*. 2021; 37: 102-120.
- [35] Jelenc L, Lerner S, Knapic V. Strategy deployment using PDCA cycle. In Proceedings of the 5th International Scientific Conference Lean Spring Summit, Zagreb, 25 June 2020.
- [36] Traditional media vs. new media: Which is beneficial. Available online: <https://www.techfunnel.com/martech/traditional-media-vs-new-media->

A Systematic Review of Cognitive Ergonomics and Safety: General Trends and Application Areas

Uğur ATICI¹ , Aylin ADEM^{2*} , Mehmet Burak ŞENOL³ , Metin DAĞDEVİREN⁴ 

¹Alfer Mühendislik, Çankaya, Ankara

^{2,4}Gazi University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Ankara, Turkey

³Tusaş, Kahramankazan, Ankara

Article Info

Review article
Received: 19/10/2023
Revision: 13/11/2023
Accepted: 14/11/2023

Keywords

Cognitive Ergonomics
Literature review
Mental workload
Neuro-ergonomics

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 19/10/2023
Düzeltilme: 13/11/2023
Kabul: 14/11/2023

Anahtar Kelimeler

Bilişsel Ergonomi
Literatür taraması
Zihinsel iş yükü
Nöro-ergonomi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study offers, constructive analyses of scientific publications on CE, by combing the literature and summarizing the current knowledge in a cogent way. As a result, it is predicted that CE activities will be used to solve cognitive problems in more and more areas and will take their place soon especially in Metaverse application and software. / Bu çalışma, literatürü tarayarak ve mevcut bilgileri özetleyerek, bilişsel ergonomi (BE) ile ilgili bilimsel yayınların yapıcı analizlerini sunmaktadır. Sonuç olarak BE etkinliklerinin giderek daha fazla alanda bilişsel sorunların çözümünde kullanılacağı ve yakın zamanda özellikle Metaverse uygulama ve yazılımlarında yerini alacağı öngörülmektedir.

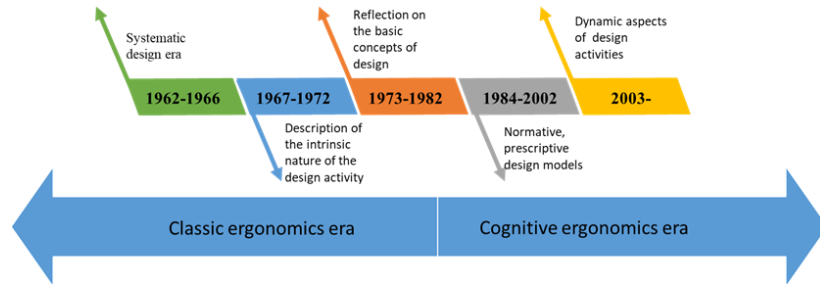


Figure A: The evolution of cognitive ergonomics / Şekil A: Bilişsel ergonominin evrimi

Highlights (Önemli noktalar)

- Cognitive ergonomics has a wide application area from aviation to health. / Bilişsel ergonomi havacılıktan sağlığa kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir.
- Cognitive ergonomics studies can be classified into 4 main groups with 13 sub-groups. / Bilişsel ergonomi çalışmaları 13 alt gruba 4 ana gruba ayrılabilir.
- Neuroergonomics and cognitive ergonomics have a lot of common attributes. / Nöroergonomi ve bilişsel ergonominin pek çok ortak özelliği vardır.

Aim (Amaç): The main aim of this study is to reveal the studies on Cognitive Ergonomics (CE), determine general trends, show the gaps of the literature. / Bu çalışmanın temel amacı Bilişsel Ergonomi (BE) ile ilgili yapılan çalışmaları inceleyerek, literatürün genel eğilimini belirlemek, literatürdeki boşlukları ortaya koymaktır.

Originality (Özgünlük): The literature review on CE is quite limited. The most comprehensive review of the CE literature between 1974-2021 was conducted. / BE ile ilgili literatür araştırması çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada 1974-2021 yılları arasında BE literatürünün kapsamlı incelemesi yapılmıştır.

Results (Bulgular): 1958 papers identified from Electronic Databases, 254 of them were selected. The PRISMA technique was used for the review process. As a result, CE studies were classified into 4 main groups with 13 subgroups. / Elektronik Veritabanlarından belirlenen 1958 makaleden 254'ü belirlenmiştir. PRISMA tekniği, BE literatürünün analizi için kullanılmıştır. Sonuç olarak BE çalışmaları 13 alt gruba 4 ana gruba ayrılmıştır.

Conclusion (Sonuç): It is predicted that CE activities will be used to solve cognitive problems in the rapidly digitalizing world and will take their place soon especially in Metaverse application and software. / Hızla dijitalleşen dünyada, BE ile ilgili etkinliklerinin bilişsel sorunların çözümünde kullanılacağı ve yakın zamanda özellikle Metaverse uygulama ve yazılımlarında yerini alacağı öngörülmektedir.



A Systematic Review of Cognitive Ergonomics and Safety: General Trends and Application Areas

Uğur ATICI¹ , Aylin ADEM^{2*} , Mehmet Burak ŞENOL³ , Metin DAĞDEVİREN⁴

¹Alfer Mühendislik, Çankaya, Ankara

^{2,4}Gazi University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Ankara, Turkey

³Tusaş, Kahramankazan, Ankara

Article Info

Review article
Received: 19/10/2023
Revision: 13/11/2023
Accepted: 14/11/2023

Keywords

Cognitive Ergonomics
Literature review
Mental workload
Neuro-ergonomics

Abstract

The primary purpose of this study is to reveal the studies on Cognitive Ergonomics (CE), determine general trends, show the gaps and extract new knowledge from the body of the literature. Ergonomics evolved from classical to physical and CE. The literature review on CE is quite limited. Thus, the most comprehensive review of the CE literature between 1974-2021 to provide an original perspective and extend what is known through analysis, modeling and introduction of new theories was conducted. 1958 papers identified from Electronic Databases, 254 of them were selected and included in the analysis. The PRISMA technique was used for the systematic reviews of CE literature with the statistical evidences and detailed discussions. As a result, CE studies were classified into 4 main groups with 13 subgroups. This study offers, constructive analyses of scientific publications on CE, by combing the literature and summarizing the current knowledge in a cogent way. Thus, a basis to enhance future applications in CE was provided. It is predicted that CE activities will be used to solve cognitive problems in more and more areas in the rapidly digitalizing world and will take their place soon especially in Metaverse application and software.

Bilişsel Ergonomi ve Güvenliğin Sistematik Bir İncelemesi: Genel Eğilimler ve Uygulama Alanları

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 19/10/2023
Düzeltilme: 13/11/2023
Kabul: 14/11/2023

Anahtar Kelimeler

Bilişsel Ergonomi
Literatür taraması
Zihinsel iş yükü
Nöro-ergonomi

Öz

Bu çalışmanın temel amacı Bilişsel Ergonomi ile ilgili yapılan çalışmalarını ortaya koymak, literatürün genel eğilimini belirlemek, literatürdeki boşlukları ortaya koymak ve literatürden yeni bilgiler edinmektir. Ergonomi bilimi yıllar içinde klasikten fiziksele ve bilişsel ergonomiye doğru evrilmiştir. Bilişsel Ergonomi ile ilgili olarak yapılan literatür araştırması çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada orijinal bir bakış açısı sağlamak ve güncel literatürü analiz, modelleme ve yeni teorilerin tanıtılması yoluyla genişletmek için 1974-2021 yılları arasında bilişsel ergonomi literatürünün kapsamlı incelemesi yapılmıştır. Elektronik Veritabanlarından belirlenen 1958 makaleden 254'ü seçilerek çalışmaya dahil edilmiştir. PRISMA tekniği, bilişsel ergonomi literatürünün istatistiksel kanıtlar ve ayrıntılı tartışmalarla sistematik olarak gözden geçirilmesi için kullanılmıştır. Sonuç olarak bilişsel ergonomi çalışmaları 13 alt gruba 4 ana gruba ayrılmıştır. Bu çalışma, literatürü tarayarak ve mevcut bilgileri özetleyerek bilişsel ergonomi ile ilgili bilimsel yayınların yapıcı analizlerini sunmaktadır. Böylece, bilişsel ergonomide gelecekteki uygulamaları geliştirmek için bir temel sağlanmıştır. Hızla dijitalleşen dünyada, bilişsel ergonomi ile ilgili etkinliklerinin giderek daha fazla alanda bilişsel sorunların çözümünde kullanılacağı ve yakın zamanda özellikle Metaverse uygulama ve yazılımlarında yerini alacağı öngörülmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Cognition refers to mental processes such as remembering, processing and transforming information [1]. Cognitive processes are examined in three main groups: sensation, attention and

working memory. The feeling is the perception of stimuli obtained through sense organs and caution means focusing perception on a specific source of stimulation. Memory refers to the process of storing information. Memory is divided into short-term memory, long-term memory and semantic memory,

where cognition is stored in the individual's memory.

The operators must perceive, process, comprehend and react to the warnings and information given by the systems used in stressful occupations. Considering that most of the accidents in manufacturing, aviation, health and many other sectors are caused by human-system interaction, cognitive ergonomics aims to reduce mental fatigue, investigates human errors and finds ways to avoid these errors. In this context, it is clear that cognitive ergonomics is one of the essential tools in preventing accidents. Cognitive ergonomics has been applied in different fields, especially electronic devices, software, interface and instrument panel design.

Different types of human-machines or human-computer interaction are likely to emerge with the digitalizing world. The application areas of cognitive ergonomics include determining the mental workload parameters of blue-collar personnel in the manufacturing industry, evaluating the cognitive load of a computer engineer working at a desk and measuring the mental load experienced by a student in distance education. The primary purpose of this study is to examine the studies on cognitive ergonomics to determine the general trends and show the gaps in the literature. As a result, this study conducted an extensive literature search on cognitive ergonomics. It has been observed that the literature research on cognitive ergonomics is quite limited and it has been determined that the most comprehensive study is done by Andrev et al. (1996) includes the articles between 1989 and 1996 [2]. The distinguishing aspect of this paper is that it presents most comprehensive literature review of cognitive Ergonomics. This study aims to create a standard definition of cognitive ergonomics, reveal new application areas and create a hierarchical structure for cognitive ergonomics studies.

The study is structured as follows: The second section introduces cognitive ergonomics with its essentials. In the third section, we explained our systematic literature review approach and a summary of statistical information about the studies in the literature. In the fourth section, studies reviewed are classified. The evaluation of the metaverse concept with cognitive ergonomics is presented in section five. The relationship between neuro-ergonomics and cognitive ergonomics is examined in section six and concluding remarks are given in the last section.

2. RESEARCH METHODOLOGY (ARAŞTIRMA METOLOJİSİ)

In this study, articles published between January 1974 and December 2022 (including early access publications) were reviewed. Springer, Emerald Insight, CiteSeerX, Taylor Francis, Science Direct, Hindawi, and Google Scholar databases were searched with "cognitive ergonomics". The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) method was employed for the systematic review of cognitive ergonomics literature (please see Figure 1) [3].

Along with the "cognitive ergonomics" keyword, the research is detailed with twenty-four secondary keywords (please see Table 1). The first 100 titles for each term were analyzed. Secondary keywords were used to classify studies in the literature and the usage areas of cognitive ergonomics. 1958 studies were inspected in total, 467 studies were selected for analysis and 254 of them found to be related with our paper's subject and they were included in this study. The number of studies reviewed with each keyword is presented in Table 1.

Table 1. Keywords and number of articles reviewed (Anahtar kelimeler ve incelenen makalelerin sayısı)

Secondary Key words	Number of publication reviewed	Secondary Key words	Number of publication reviewed
Aerospace	95	Measuring	13
Application	73	Military	51
Automation	45	Perception	11
Aviation	52	Performance	138
Design	20	Productivity	67
Environments	90	Psychology	91
Experience	53	Risk	47
HCI	208	Safety	60
Health	63	Training	87
Interaction	192	Transport	190
Interface	135	Workload	65
Learning	96	Neuroergonomics	16

The article selection procedure is shown in the PRISMA flowchart in Figure 1. The search yielded 1958 studies from the selected databases. During the first stage of evaluation, papers were assessed depending on their abstracts and duplication. Studies not emphasizing cognitive ergonomics in abstract and duplicate articles were removed from 1958 publications and 1491 papers were eliminated in total. Then, studies that do not refer to cognitive

ergonomics in the conclusion section or examine cognitive ergonomics under a single section evaluated as "the unfocused studies on cognitive ergonomics". The unfocused studies on cognitive ergonomics (n=195) and papers that are not retrieved (n=18) were excluded. After excluding all these irrelevant papers in three steps, a total of 254 studies were left to be included in our research.

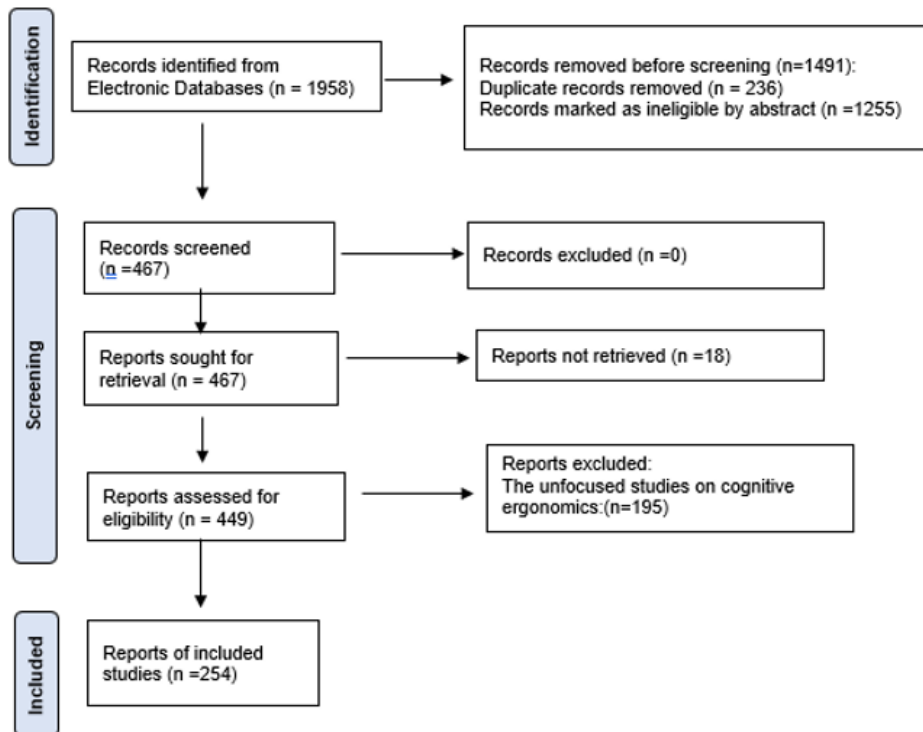


Figure 1. Flowchart for PRISMA protocol (PRISMA protokolünün akış şeması) [3]

3. RELATED WORKS (İLGİLİ ÇALIŞMALAR)

3.1. Cognitive Ergonomics and Respective Studies (Bilişsel Ergonomi ve İlgili Çalışmalar)

Physical and cognitive ergonomics have many similarities and differences. Classical risks, work quality and personnel safety parameters are examined in physical ergonomics. Posture, number of repetitions, vibration, dust, sound level, temperature and environmental factors are reviewed [4, 5]. Empirical research methods determine the physical demands of a job. Different analytical risk assessment methods have been developed for different risk types. There are various risk assessment methods which has revealed different findings. The risk assessment process includes identifying potential threats and assessing the degree of risk.

Cognitive ergonomics includes collaboration of human reliability engineering and psychology field. Risk analyses turns out to be more realistic with the touch of psychology in cognitive ergonomics,

Thanks to risk analysis, cognitive ergonomics reveals the chain of events resulting in accidents. Accident anatomy allows individuals to understand how their actions contribute to business risks. On the other hand, the analysis of the casualties and faulty behaviors are emphasized in cognitive ergonomics.

There are also fundamental misconceptions about cognitive ergonomics, such as the user cannot handle defined mental workload or perform defined work, the user-friendly label is not given within a standard and cognitive expectations of users are considered same [6]. Considering purposes, cognitive ergonomics differs from physical ergonomics. There are four cognitive analysis goals in cognitive ergonomics, which are shortening interaction time, minimizing human error, shortening learning time and increasing user satisfaction [1]. The objectives of cognitive ergonomics are presented in Figure 2.

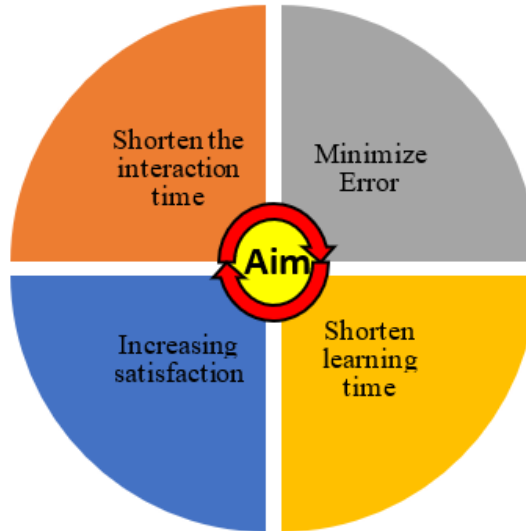


Figure 2. The objectives of cognitive ergonomics (Bilişsel ergonominin amaçları) [1]

Cognitive ergonomics is one of the three methods used to understand the work environment in workers' collaborative environments. Tasks and activities are analysed by using cognitive ergonomics. Tasks express the open side of the job, while activities express the way of dealing with the variability and complexity of the task [7].

Cognitive factors are related to mental processes such as motor response. Activities require cognitive effort as well as physical effort. Although cognitive and physical processes are considered separately,

they are essential in balancing multidimensional work demands [8]. The main topics examined within cognitive ergonomics are analyzing and modeling cognitive tasks, decision making, presentation and visualization of information, mental workload, work stress, and collaborative aspects [9]. Factors determining workload in cognitive ergonomics are mental workload, decision making, performance, human-computer interaction, human reliability, job stress and training.

In a study, the relationship between physical task load and cognitive task performance was examined. When high-fit young men do eight minutes or less of physical activity, mental performance is not lost and they respond more quickly to auditory stimuli than to visual stimuli [10]. For this reason, cognitive ergonomics plays a critical role in determining task performance.

The results obtained in cognitive ergonomics are also valid outside the laboratory and generalized, that makes cognitive ergonomics stand out in real-life applications. [11]. Cognitive ergonomics deals with mental processes such as perception, memory and thinking in human and system interaction [8]. Cognitive task analysis helps to understand how people perform tasks using cognitive skills. The cognitive study analysis reveals the relationship between human mental processes and behaviors [12].

Cognitive abilities limit the physical skills. Cognitive performance decreases due to cognitive fatigue just as performance decreases due to physical fatigue. Physical performance increases when a physical action is repeated or learned as a skill and cognitive performance becomes a skill depending on repetition [13]. Light variation, limb and object movements inhibit efforts to keep knowledge active in cognition [14]. Sensible, meaningful sounds in environment impair perception, attention and the way of processing information. Warnings and signals must be distinguishable from audible sounds in the system and machine designs. [15]. In cognitive ergonomics, receiving perception in more than one sensory organ facilitates the processing of information and at the same time, cross-affective connections limit perception [16]. Designers should consider the cognitive load brought by cross-affective links [17].

Learning new skills and related information is a slow process for individuals in workplaces. However, long-term storage memory is unlimited and unique abilities can be acquired at any age [18]. In workplace, individuals use practical rules that result in acceptable solutions with little cognitive load [19]. Many parameters affect the success of cognitive skills in job. [20]. Determining decision support arguments, group work, developing a standard behavior and correcting wrong assumptions can be given as examples of the application areas of cognitive ergonomics in the workplace. It takes time for individuals to specialize in their fields of work by gaining experience. Expertise means performance in tasks that require knowledge and skills. Experienced personnel's

performance is evident in some regions of cognition [21]. For a new employee, it takes a certain amount of time for daily tasks to be reflex. It is more efficient for workers to work in their core expertise rather than perform additional tasks requiring other skills. Several factors make it difficult for workers to show the desired performance level. Simultaneous multitasking, noise and interruptions in work are examples of these factors. These factors can cause work accidents. Thus, it is vital to give importance to cognitive ergonomics in terms of occupational safety. Especially the physical and mental needs of the workers in the heavy and dangerous works should be met [22]. The working environment is not always stable. Moving equipment and time pressure in dynamic environments impair situational awareness. Situational awareness consists of three levels. These are perception, comprehension and projection [23]. Cognitive ergonomics improves operator skills by reducing cognitive load and replacing errors. System users interacting with humans should be optimally matched to their cognitive abilities [24].

Mental workload is one of the main application areas of neuro-ergonomics. Employees should be given work that is compatible with their abilities. Cognitive ergonomics is indispensable for complex designs. Cognitive ergonomics practices affect work stress and workplace productivity [25]. Human-computer interaction studies on cognitive ergonomics started in the 1980s with coloring in visual interfaces for laboratories, models for designers, task analysis for information gaps and text display editor applications [26]. Interface design was considered as art until the 1990s. After this period, two different approaches e.g. formal and informal were applied to interface design. These two approaches include Command Language Grammar and Cognitive Complexity [27]. Cognitive ergonomics provide the perception of the information presented to the user through interfaces. Cognitive ergonomics plays a vital role in human-machine interaction.

Cognitive ergonomics is used in all disciplines with human-machine interaction. Especially in the health sector, human-machine interaction is standard and users make critical decisions through this interaction. Lawler (2011) examined the effects of cognitive ergonomics and information technologies on health, [28]. Different industries in which cognitive ergonomics are applied are presented in Figure 3.

Cognitive ergonomics is essential for decision-makers. It has been used as an additional tool in the

multi-criteria decision-making process to facilitate the decision-making process [29]. Increasing product comfort depends on the understandable and accessible usage of products with a low cognitive load. A fuzzy-based decision-making technique was developed by Mohanty et al to compare the products' ease of use [30]. Benmoussa et al. (2019) used AHP to prioritize cognitive ergonomics factors in the interface evaluation of information systems [31]. A cognitive model related to the decision-making process of operators performing the monitoring task was created by Vicente et al [32].

Design activities include intense cognitive activity. Defining the cognitive activities of the designer will enable them to overcome the difficulties in both software design and system design. The cognitive activities of the software designer are classified as comprehensive purpose analysis, quick solution

search, solution evaluation and continuous evaluation of personal procedures at the early design stage. The disadvantages of cognitive design activities depend on selecting the solution, comparing alternatives, the rapid solution evaluation, insufficient user participation and poor design logic [33]. It is a more accurate approach to model cognition as an interaction between meanings rather than an information processing model in directing individuals' activities towards specific goals [34]. Depending on the development of technology, ergonomics was evolved from classical ergonomics to physical ergonomics and cognitive ergonomics in the early 1980s [35]. In the last fifty years, individual design activities have been handled with different cognitive perspectives. The evolution of cognitive ergonomics is presented in Figure 4.



Figure 3. Application of cognitive ergonomics in various industries (Bilişsel ergonominin çeşitli endüstrilerde uygulanması)

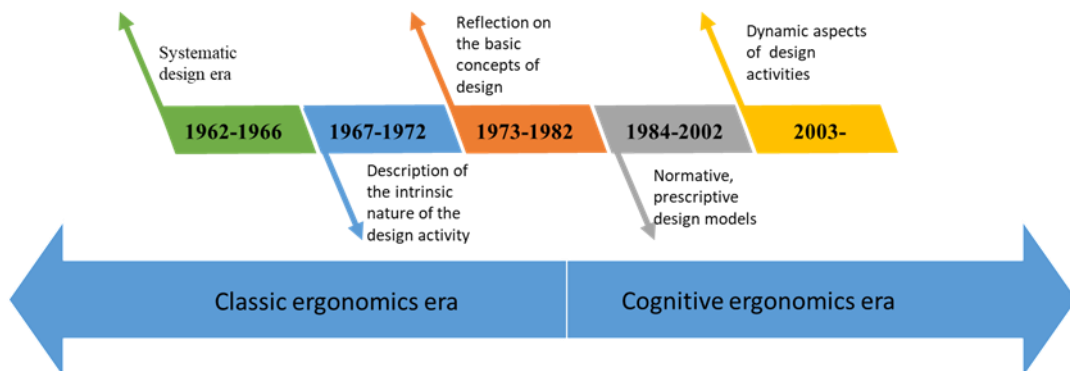


Figure 4. The evolution of cognitive ergonomics (Bilişsel ergonominin evrimi)

Whether cognitive ergonomics can be accepted as a separate discipline or not has been discussed and researchers have raised some doubts [36]. Studies

on the process and methodology of cognitive ergonomics in the literature have allowed cognitive ergonomics to emerge as a new discipline.

Examples of these studies are Fason (1991), Venda (2000), Blomé et al. (2006), Bisan (2007, 2008) and Eraslan (2010) [37] [38] [39] [40] [41] [42]. Human-computer interaction promotes the development of interaction between the human mind and information systems. Socio-technical factors are another parameter to be considered in human-computer interaction. [37]. Three fundamental laws of cognitive ergonomics were expressed by Venda (2000). In the first law, any cognitive strategy is defined as a function of work efficiency related to the work factor. Each cognitive task is performed using several cognitive strategies in the second law. In the third law, work efficiency changes depending on the learning processes [38]. An interactive ergonomic guidance system based on cognitive ergonomics was developed by Blomé, et al. (2006). It has been determined that the instructions supported by the text and visual elements are more effective than the classical ones in terms of usage and comprehensibility [39]. The approaches of cognitive ergonomics to job analysis were examined by Bisantz (2007). The studies examined were divided into two groups as data collection and analysis studies [40]. Work-centered applications of cognitive ergonomics were also investigated by Bisantz (2008) [41]. Cognition includes perception, storing and remembering information, processing information and using the senses. Cognitive activities are as tiring as physical activities [42].

The cognitive performance of individuals during they are running on the field was tested by Blakely et al. (2016) to determine whether cognitive performance changes depending on physical performance. Cognitive load increased after running regardless of terrain [43]. The relationship between balance and the mental workload was examined by Cullen and Agnew (2016). It has been reported that cognitive strain may increase when balancing activity becomes difficult [44]. The estimation of subjective recovery times for conditions requiring variable physical and mental processing was examined by Ye and Pan (2016). Cognitive performance has been reported to decrease after brisk work but increase after personal recovery. Considering the studies of Blakely et al. (2016), Cullen and Agnew (2016), and Ye and Pan (2016), it can be stated that there is a relationship between cognitive ergonomics and physical ergonomics where physical condition affects cognitive status [43-45].

The mental workload in decision-making and monitoring tasks was examined by Liu and Wicken (1994). It has been reported that the reactions are

sensitive to the presence of perceptual/cognitive workload, but when the behaviors become automatic, the responses also turn into reflexes [46]. Roth et al. (1992) examined mental demands and simulation errors [47]. Barriers to the development of cognitive ergonomics were discussed by Darses (2001). Cognitive ergonomics remains in the field of research rather than practice. The findings of cognitive ergonomics stay in university or company laboratories and do not emerge as practical tools. It has been reported that this circumstance is the biggest obstacle to cognitive ergonomics [48].

All industries affect each other. A technology developed for one sector is used for different industries. Similarly, knowledge transfer between socio-technical systems can provide many conveniences. Complex systems within the same cognitive domain were compared by St-Maurice and Burns [49]. It is crucial to examine the dynamics of cognitive control in complex systems where operators have partial control. Unlike laboratory studies, dynamic cognitive modes and the distribution between modes vary according to job requirements in real life. To the extent that human cognition can adapt to mode change, it has an effective information transfer for systems with dynamic control. Hoc and Amalberti investigated the dynamics of cognitive control to achieve the target performance level in mental mode changes [50]. Activities were prioritized in cognitive control processes by Bodin and Krupenia [51]. The data interface was integrated with the mental model by examining the focus of information processing strategy by Goh and Coury [52]. The history of cognitive ergonomics and its potential future uses were reviewed by Long [53].

As the systems used in information technology develops, the interaction between information technologies and people shifts from physical systems to logical systems. In terms of human-computer interaction, cognitive ergonomics is a science that develops system design by considering individual and cognitive system characteristics. Cognitive ergonomics allow the development of new methods depending on technological development and meets the needs of today's information society. The relevant field of cognitive ergonomics today is logical systems [54]. Cognitive load does not change only with the information perceived through the senses. It is also influenced by collaboration with mission stakeholders. Sharing the cognitive load contributes positively to the physical ability of the individual [55]. Task analysis of complex systems was made by Naikar et al. and these systems were examined

with cognitive job analysis [56]. New system designs were also subjected to cognitive analysis by Bisantz et al. Emphasis is placed on the importance of cognitive research in creating large systems such as aircraft carriers and transport aircraft [57]. A new method of cognitive analysis for cost-effective systems engineering has been proposed by Elm et al. [58]. Cognitive analysis was used for reliable intersection designs by Cornelissen et al. [59]. Read et al. (2012) conducted a literature search on the design and applications of cognitive job analysis [60]. Stevens and Salmon used cognitive work analysis to evaluate the relationships between the engineering and urban design of pedestrian roads. It was determined whether the pedestrian paths met the design requirements [61]. Roth examined the usage of cognitive analysis methods in system analysis. It was informed that mental needs should be discussed in detail and that cognitive analysis is error-prone [62]. Militello et al. suggested using cognitive systems engineering to bring together mental needs and goals [63]. Human-machine automation is modeled by cognitive job analysis by Li and Burns [64]. Control task analysis in complex systems was examined by cognitive work analysis by Naikar et al. An application was made for early air control and warning systems in cognitive ergonomics [56].

Cognitive job analysis is also widely used for sociotechnical designs. However, it is challenging to conceptualize the analysis results. Translating unconceptualized results into tangible products is even more difficult. The Cognitive Work Analysis Design Tool (CWA-DT) was developed by Read et al. which enables the transformation of cognitive analysis results into concrete sociotechnical system designs [65]. The software development process is

inherently costly and takes long development times. This is an obstacle to cognitive analysis of the software development process. Object-oriented software, which emerged as an effective software development method, allows cognitive analysis. Wei and Salvendy developed a mental task analysis model using an object-oriented program [66]. Cognitive analysis was performed for ideas incubated by Confer and Batra [67]. Cognitive task analysis has begun to receive increasing attention in the ergonomics literature after the 1990s. Job analysis and job development were examined together and the potential of cognitive task analysis was evaluated after the 1990s [68]. Studies on cognitive and physical ergonomics have emerged as a different discipline as a result of studies on cognitive and physical ergonomics.

3.2. Classification of Previous Studies (Önceki Çalışmaların sınıflandırılması)

Studies in cognitive ergonomics can be classified into four main groups under the headings of measuring, applications, safety and HCI. The classification of the previous study is presented in Table 2 in accordance with the hierarchical classification given in Figure-5. Studies examined within the scope of measurement generally focused on reducing and measuring the mental workload that multitasking brings to the individual, determining the cognitive factors that cause human errors and determining the individual's cognitive performance. Studies that prevent human error in cognitive ergonomics can be classified under human error. Studies conducted to predict and measure cognitive ergonomics to individual performance are classified under the title of the performance.

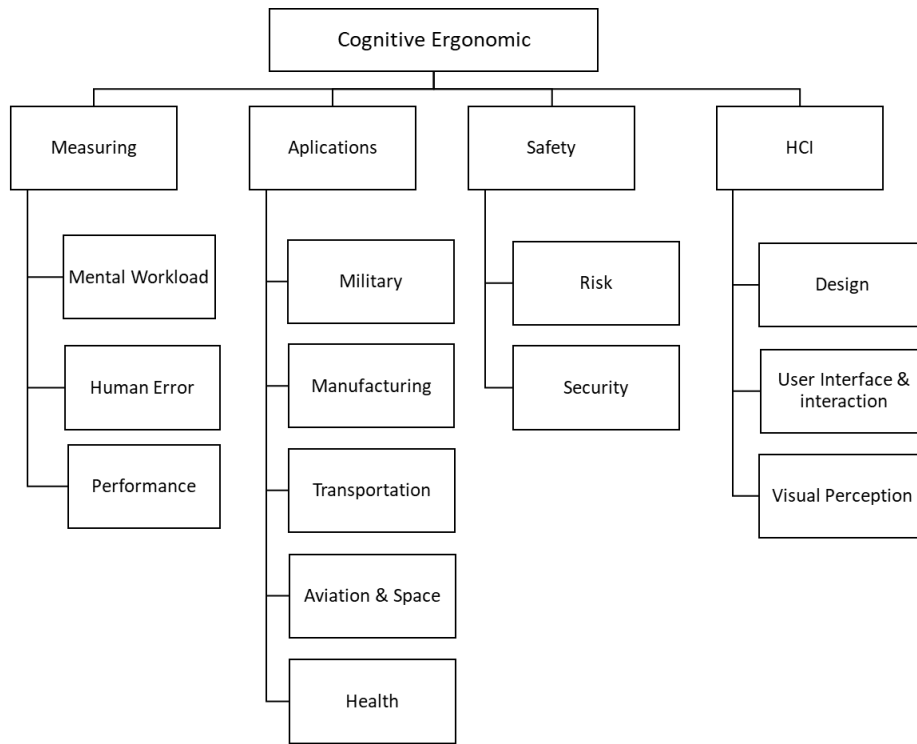


Figure 5. General classification of cognitive ergonomics studies (Bilişsel ergonomic çalışmalarının genel sınıflandırması)

Studies in cognitive ergonomics were examined under five different sub-headings according to the field of application. These titles can be expressed as military, manufacturing, transportation, aviation & space and health. The interface design of the control systems of robots used on the battlefield, the cognition factors in the autonomous control of land vehicles and the complexity of automation systems in flight safety are the studies examined under this title. In addition, studies examining the cognitive performance of drivers in different road conditions, the level of knowledge contained in traffic markers and signs, the detection of driver drowsiness, the mental workload of control rooms and the instrument panels of autonomous vehicles in terms of cognitive ergonomics are examined under the title of the application. Studies classified under the heading of safety are studies related to risk assessment and security. Studies that examine the development of software tools suitable for risk analysis, cognitive ergonomics criteria and the reduction of risks associated to cognitive ergonomics in flight operations are also under the heading of safety.

Studies classified under the title of human-computer interaction are divided into three sub-titles. Cognitive ergonomics is indispensable for user interface and interaction. Whether the interfaces are designed considering the cognitive ergonomics criteria and whether they will reduce the individual's stress is the leading research topic of the studies in this field. Since design activities are carried out in different disciplines, cognitive ergonomics in design activities has spread over a wide range. Cognitive ergonomics in design activities; machine interface design, empowering designers, job design, individual design activities, decision support system design, web design and quality system design can be given examples. Designing systems with a balanced cognitive workload increases the level of detection. The information transfer load between the individual and the interface should be kept at the perception level. Tablet, computer and machine interfaces are expected to facilitate perception. The menu designs used in interfaces and the amount of information presented to the user on the screen should not exceed the level of visual perception.

Table 2. Classification of the previous studies (Önceki çalışmaların sınıflandırılması)

Major Issue	Sub-Issue	Subject	References	Included Publication Number
Measuring	Mental Workload	Studies on the individual's cognitive workload	[6-8, 19, 20, 43, 45-49, 55, 56, 69-113]	34
	Human Error	The effect of cognitive level on human error	[62, 114-127]	58
	Performance	Studies to increase and measure cognitive performance	[10-13, 18, 22, 44, 54, 58, 66, 67, 128-141]	25
Applications	Military	Impact of cognitive ergonomics on education, teamwork, and awareness	[50, 51, 57, 142-147]	9
	Manufacturing	Studies on the performance of critical component design workgroups and inter-team communication in the manufacturing sector	[29-32, 63, 148-155]	13
	Transportation	Studies on the cognitive ergonomics requirements of traffic markers, vehicles, and indicators	[59, 61, 65, 156-168]	16
	Aviation & Space	Studies on cognitive ergonomics in instrument panels in flight towers, aircraft, spacecraft	[23, 169-176]	9
	Health	Cognitive ergonomic reviews of healthcare devices and automation systems	[28, 177-183]	8
Safety	Risk	Cognitive ergonomic evaluation of risk software tools	[4, 5, 184-188]	7
	Security	Cognitive ergonomic evaluation of safety management, occupational health and safety process improvement, evaluation of driver performance and human-related factors.	[14, 15, 189-193]	7
HCI	Design	Cognitive ergonomics in design activities in different disciplines	[17, 39, 42, 194-209]	19
	User Interface and interaction	Cognitive issues during the use of interfaces, visual performance analysis, users' visual attention and pilots' performance in flight simulators were examined.	[1, 16, 24, 26, 27, 34, 37, 41, 52, 64, 210-232]	33
	Visual Perception	Cognitive ergonomics studies aimed at increasing the level of visual perception	[233-242]	10

Different models and software have been used in studies on cognitive ergonomics. Since the studies in cognitive ergonomics cover various disciplines, the software and models used are spread over a wide

range. The list of models and software used in cognitive ergonomics studies in the literature is presented in Table 3.

Table 3. Models and software used in cognitive ergonomics studies (Bilişsel ergonomide kullanılan model ve yazılımlar)

Name of Model or Software	Description	References
SOCA-CAT	A tool for communications planning on military platforms.	[147]
CWA-DT	A socio-technical model that enables cognitive job analysis	[65]
SYNOP	Rule-based software that allows cognitive ergonomic evaluation of human-machine interfaces	[221]
PETESE	A tool for cognitive ergonomic evaluation of the educational activity.	[211]
NASA-TLX	Cognitive task load analysis tool.	[77, 100, 102, 103]
Delphi-ORA	An order-relationship technique based on the Delphi technique allows the evaluation of subjective judgments.	[174]
SA	Measurement tool for pilots' cognitive situational awareness	[176, 243]
SID	A tool that allows for reducing the cognitive load imposed by unmanned aerial vehicles on the operator.	[231]
SEEV	A tool for cognitive awareness of warning systems in nuclear power plants.	[92]
Autaki	A recommended tool to support learning at work	[229]
SimTrA	A cognitive model for evaluating the functionality of electronic components.	[131]
CWA	Cognitive business analysis tool	[85]
AAM	A tool for detecting cognitive drowsiness from driver facial expressions.	[162]
SAFERIDER	A tool to improve the driving safety of motorcyclists	[159]
TRACEr	A tool that allows the identification of cognitive factors that cause human error in power distribution systems.	[125]
MATB-II	Multitasking capability measurement tool to determine operator performance.	[94]
NARIDAS	Cognitive risk assessment tool.	[185]

A. Mental Workload

One of the primary purposes of cognitive ergonomics is to keep the cognitive load at an acceptable level and the perception level at the highest level throughout the shift. Cognitive ergonomics deals with the cognitive interaction between people and the work environment. The use of cognitive ergonomics is not limited to human-computer interaction. The primary benefit of cognitive ergonomics in other disciplines is determining the cognitive load [82].

Work environments with a high cognitive workload are call centers. Today, call centers, which provide increased employment opportunities, serve different sectors. Examining call centers within the scope of cognitive ergonomics presents new problems. Operators in call centers should keep in mind only some of the information required to perform any operation and use information technology to enter data in line with the customer's demands and

directives [71]. Call center operators interact with the computer screen while meeting with the customer. The mental workload required by the operators to avoid making mistakes during the meeting with the customer is equal to the sum of the content of the conversation and the cognitive load brought by the use of the interface. Another area where mental workload should be considered is design activities. The cognitive workloads of designers can be reduced by using knowledge-based design support systems. The reduction in cognitive workload is primarily indirect. Interface and warning systems developed to reduce mental workload are disabled by experienced designers. When the system's effectiveness and alerting systems are anticipated, preventive steps are taken to avoid workload and less cognitive load is incurred [109].

The combination of cognitive neuroscience and cognitive ergonomics has been termed neuro-ergonomics. Neuro-ergonomics studies situations

characterized by poor individual behavior and performance. These situations can be summarized as neurobiological indicators of cognitive processes and capacities, cognitive status and operator activities. The operator's perception of cognitive load is related to his cognitive ability [106]. The mental loads of the devices used in cognitive ergonomics are different. It has been reported that the workload is reduced when palletizing-like operations are performed using a tablet and augmented reality device [89].

Cognitive load analysis is one of the critical ergonomic tools for examining industrial facilities. Eye-tracked jobs have cognitive loads. The cognitive load of visual tracking in complex work environments was reviewed by Durugbo (2021) [78]. Cognitive systems are widely used in the analysis of complex socio-technical systems. Cognitive workload analysis was performed by Jenkins et al. (2008) in the examination of helicopter mission planning software [86]. The cognitive load of fighter and cargo aircraft mission scenarios was examined by Kaber and Kim [88]. It is essential to measure cognitive loads in task analysis. However, it is not clear which unit of measurement the measurement will be made. Gray et al suggested a cognitive metric profile to make measurements healthier [81]. The theory and methods introduced by Salmon et al. (2010) in hierarchical workload analysis and cognitive workload analysis are compared [105]. Peacock (1994) proposed cognitive workload analysis based on fuzzy sets [76]. The cognitive capacity of the machine and computer operators has been examined [75]. Cognitive analysis of e-book reading devices was performed by Wu et al [112].

B. Human Error

Mass production lines are generally made up of robots to minimize human errors. The cognitive aspect of human-robot interaction in the manufacturing industry was examined by Faber et al. (2015) in coming years. In the future, the flexibility offered by humans will be combined with the precision provided by robots in production facilities; therefore, cognitive ergonomics should be considered in the design of production lines [116].

Controlling machines is cognitively challenging for operators, and for that a method called “a morphological box” was proposed by Czerniak et al which allows optimization of the stress level of machine operator and minimizes human error [115]. Workplace design affects employees' mental health and inappropriate workplace designs cause human

error. The effects of workplace design-related stress on cognitive activities were investigated by Alyan et al. [114]. Socio-technical systems consist of human and non-human systems in mission-critical areas. A model has been proposed by Jenkins et al. (2017) that aims to increase the capabilities of users to deal with unexpected situations and minimize human errors [119]. Decision makers tend to make systematic mistakes in project management due to their limited cognitive abilities. Mistakes are caused by biases like Anchoring Effects, Accuracy Bias, Managerial Insights [117]. It has been reported that cognition-related human errors occur in the task of monitoring and control, problem coordination and resolution, continuous production activities, abnormal conditions, the uncertainty of conditions, insufficient academic support and lack of direction. Root causes of errors are reported as multiple simultaneous tasks, full-time work tempo and lack of experience [244].

The cognitive load required by each device used is different. Variable cognitive loads cause human error. Lee et al. (2014) examined how cognitive ergonomic workloads changed in robotic and laparoscopic surgery. Specialists who start robotic and laparoscopic surgery have a high cognitive workload and operators may make mistakes due to cognitive load [180].

C. Performance

Cognitive and physical ergonomics affect individual fitness in workplace. Cognitive ergonomics also affect the cognitive and physical performance of worker. Cognitive ergonomics studies were conducted to increase and measure the performance of employees. Parameters such as user response times and error rates were monitored. It has been reported that cognitive performance changes depending on the hardware features of the terminal [136].

The continuous improvement in business is a must due to the increasing competition. It has been reported that the performance of the personnel will increase with the better management of stress and use of cognitive ergonomics techniques in the marketing units [139].

Capabilities needed in flight planning were determined by Volz and Dorneich and it was determined that cognitive performance was related to the planning task during the daily shift [140]. Standing work on mental and physical performance during cognitive tasks was investigated by Kang et al [135].

D. Military

Cognitive ergonomics have been widely studied in mission-critical military fields. Working conditions of military personnel require high physical and psychological readiness. For example, when fighter jet pilots are exposed to high G-forces, they are simultaneously exposed to increased cognitive load.

Designs that reduce the cognitive workload in human-machine interaction should be user-friendly. In this context, user-friendly designs should include mental model support, keep the interaction simple and use appropriate colors. In addition, this concept of usability means that objects that look similar move at the same rate, the results of the same actions in automation are the same and the automation is generally self-consistent. Mental model support means modeling the user's mind, avoiding irrelevant information and presenting all the information necessary for the task. The simplicity criterion means that the notifications are simple, the data is displayed according to the frequency of use and the visual elements are presented hierarchically. The use of color means that the colors are monochrome and the number of colors is kept to a minimum [142]. Military intelligence is another application of cognitive ergonomics in the defense and security sector.

The use of battle platforms also requires high cognitive performance. The role of cognitive analysis in mission planning in military platforms was examined by Stanton and McIlroy (2012). Communication and planning software on military platforms is complex and challenging to learn. A new model named SOCA-CAT, a combination of rich images and cognitive ergonomics, has been proposed to reduce the cognitive load required by military missions and make communication planning effective [147]. The cognitive workload and distribution of the personnel working in the Naval Forces Command were examined by Bridger et al. While stress models only deal with psychosocial factors, it has been emphasized that cognitive factors are important in stress management in complex environments [143].

E. Transportation

Cognitive ergonomics is indispensable for designing transportation systems. Road safety, vehicle gauges and traffic signs should be designed with cognitive ergonomic factors, where the cognitive workload has been taken into account in general. The cognitive workload of drivers against vehicle feedback on the road was investigated.

Cognitive processes of receiving information by drivers from the environment and vehicle were revealed. The tools were divided into two groups according to the cognitive feedback level. The high level of feedback increased the drivers' situational awareness [167].

There is a strong link between cognitive ergonomics and safety. Intelligent systems used in driver compartments place a burden on cognition. Even basic tasks that do not impose a cognitive load can cause accidents. For this reason, cognitive activities in the interface design used in vehicles and aircraft should consider the potential threat level [163].

A multi-criteria ergonomic approach has also been developed to select the material handling path in manual handling operations. Cognitive ergonomic factors were considered for decision-makers and it is suggested that directives must be easy to understand [166].

Situational awareness is also essential in traffic. Awareness of many objects in traffic increases driving safety. Tasks of varying complexity and the flow of information from different sources affect the driver's situational awareness. The shortness of use of systems such as vehicles and aircraft positively affect mission performance [127].

F. Manufacturing

Cognitive ergonomics has been widely studied in development, planning and design activities in the manufacturing industry. The effects of cognitive ergonomics in the design and development of commercial products for children, the child's development and the choice of toys were investigated [149].

The presentation of the information to the machine operator on the assembly lines should be analyzed in terms of cognitive ergonomics. The information presentation environment is auditory, visual, written or computer-based. The warning symbols and syntax used in the information presented are the factors to be considered [154].

G. Aviation & Space

In aviation and space, maintenance management, air traffic management and cognitive performances of pilots and astronauts were examined. Cognitive ergonomics has been used in air traffic management, air traffic flow management and unmanned aerial systems. A new human-machine interface (HMI) depending on machine learning for

air traffic control panels is investigated [170]. The cognitive task load of workers working on aircraft maintenance lines was measured [124].

The team's situational awareness in aviation is essential in terms of collaborative work. Even if they receive information on the same screen, the situational awareness of team members varies in terms of cognitive ergonomic factors [175]. Airspace management was discussed as a cognitive system by Lintern. A distributed cognitive air traffic management model is proposed for effective and safe airspace management [172]. Adriaensen et al. conducted a case study in the aircraft cockpit within the socio-technical analysis of the function of information flow type changes. The functional resonance analysis method is proposed for cognitive analysis with information transformations layered [156].

H. Health

Cognitive ergonomics also has significant application areas in the health sector. Franks and Briggs conducted cognitive performance analysis in training ventilators. [216]. The mental workload required in anesthesia procedures includes visual and auditory notifications. Information presentation and communication of the interface systems used in anesthesia have been improved [245]. In terms of design, cognitive ergonomics establishes a human-system fit and determines a starting point to improve the health system [151].

The complexity of health device alerts creates a cognitive load on user and it is an obstacle for making right decision [183]. The mechanical arm commonly used in surgical operations is a common form of human-robot interaction. Arm movements were recorded and analyzed with the Electroencephalography signal. It has been reported that there is a close link between cognitive status and human error [227].

A cognitive workload analysis of cardiac nurses was conducted by Burns et al. (2016) [177]. The mental workload of nurses and administrators was analyzed by Effken et al. for decision support tools [179]. A literature search was conducted by Jiancaro et al. on cognitive analysis studies conducted in health between 1990 and 2013 [246].

Cognitive analysis of nurses' control and monitoring tasks was conducted by Lopez et al. (2010) to prevent bedridden patients from falling out of bed [181]. In addition, cognitive ergonomic analysis of clinical devices and 3D stereoscopic screens [178,

204] and cognitive ergonomic analysis of visualized data [182] can be mentioned as cognitive ergonomics studies in healthcare.

I. Risk

Risks affect all areas of life. Risks will worsen cognition and perception levels. The placement and size of the objects on the interface involve risks in terms of cognitive ergonomics [213]. Wearable technology is rapidly taking its place in all areas of our lives. Wearable technology and physical and cognitive risks were evaluated together by Oyekan [153]. Computer games were also used as a cognitive ergonomics risk assessment tool by Tong et al. [209].

J. Security

The increase in technology usage reduces the reliability and efficiency of the system. With cognitive ergonomics, the effect of work on mind and the effect of mind on work are defined. The reliability of cognition and performance are among the main topics of cognitive ergonomics [187]. The problems encountered in the management of complex systems are the number of autonomous devices, the complexity of autonomy and new technologies. The mentioned problems should be examined within the scope of cognitive ergonomics [192]. In the industry, the issue considered in workplace safety is generally physical ergonomics. However, in the study conducted in the Norwegian petroleum industry, it was reported that cognitive processes were not given sufficient attention during the plant design phase [191]. Failure to pay attention to cognitive processes can cause occupational accidents.

One of the essential considerations in cognitive ergonomics is the reliability of cognition. The reliability of the awareness depends on operator's performance being in accordance with reported instructions. The human error rate has increased due to cognitive factors. The main reasons for the increase in human error are:

- Individuals are prone to making mistakes,
- Only human errors can be determined as a result of comprehensive analysis,
- Reduction of system errors as a result of the improvement of security mechanisms,
- The emergence of existing human errors [118].

K. Design

The contribution of cognitive ergonomics in designs has been examined in terms of problem-solving. Cognitive ergonomics significantly impacts problem definition, concept solution development, alternative selection and innovation. Cognitive ergonomics comes to the fore in clarifying the task, determining the solution and in the solution process. In describing the job, ideas with high success value are revealed with group work techniques. A comprehensive explanation of the task is given and concentration on object functions, main functions and goals are determined. The solution search principles, a new solution development strategy, basic solution development strategy and solution constraints are determined. In the solution process evaluation, general and detailed solution stages, processes and outputs are determined [202].

Industry 4.0 has brought a new concept, Engineer 4.0. In Industry 4.0, engineers will engage in more intense cognitive efforts such as communication, monitoring, supervision, collaboration and creativity [194]. Design cognition investigates the cognitive strategies of individuals who work in design processes. Sun et al. (2014) compared the cognitive efficiency of experienced and inexperienced designers in concept designs [208]. Virtual reality devices are used in engineering design processes. The use of virtual reality in design is more effective than computer-aided design [207].

L. User Interface & interaction

For an effective human data interaction, the data transfer process of the interfaces should be defined in terms of cognitive loads. Individuals are exposed to more data load than in their daily lives while interacting with interfaces. As the amount of information increases, the accuracy of individual judgment decreases. Human cognitive limits should be taken into account when designing cognitive processes. Cognitive ergonomic guidelines that facilitate data-based decision-making should be used [220].

Cognitive workload analysis is vital for web designs and users. There is a cognitive difference between the user and the designer [197]. An ergonomic tool has been developed for mental workload estimation in human-machine interface design and evaluation [232]. A rule-based approach named SYNOP is proposed for the human-machine interface's ergonomic assessment [221]. In addition, the cognitive activity index has been submitted to determine visual impact and information load [212].

In addition, human-computer interaction generally encompasses models of design, learning and understanding [215]. As the number of technological devices increases and enters daily life, interface designs have gained importance in human-computer interaction [210]. Cognitive load was also examined in e-learning platforms. Usability level in distance education systems and the visualization level of scale were determined in terms of comprehension, memory, interface, instructional design, attention and learning [228]. A review of video analysis in human-computer interaction has been made. Activities such as keyboard and mouse use were evaluated as cognitive activities. Task-related actions in human-computer interaction have been defined [223].

M. Visual Perception

Designer facial expressions were used to examine cognitive effects [239]. Adaptive control of thought-rational (ACT-R) consists of perceptual-motor, target and declarative memory modules. These modules select a rule to respond to a pattern [233]. In ACT-R theory, cognition consists of a visual module that determines object location, a processing module that determines the appropriate response and a manual module that produces processing output [203]. Kadefors and Forsman proposed a video-based method for evaluating complex operations [205]. Kolski proposed a rule-based approach for evaluating human-machine interfaces. In the proposed method, ergonomics and cognitive psychology concepts are taken into account [206]. Métayer and Coeugnet evaluated pedestrian interaction with an autonomous vehicle. It has been reported that pedestrian behavior changes according to the vehicle type [238]. Barber (1994) evaluated cognitive ergonomics for designers and users [195]. Cognitive job analysis was conducted by Read et al. to model human factors and ergonomics practitioner roles [247]. Tian et al. compared motor, visual and cognitive factors. Use of mobile phones on cognitive performance was investigated during walking. It has been reported that texting has a negative effect on walking, which is one of the motor activities [241]. Visual analyzes of remote sensing systems have been studied from a cognitive perspective [242].

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

4.1. Metaverse and Cognitive Ergonomics (Metaverse ve Bilişsel Ergonomi)

Today, human-computer interactions are not only through a screen. Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) applications have become widespread. With the development of automation systems, human-machine interaction has also increased. The concept of human-machine interaction has entered daily life [248]. One of the areas where cognitive ergonomics is mostly used is computer games. Computer games need intense communication via screen and sound. The primary purpose of the games is to increase the pleasure and usability of the user. New techniques are required to measure emotional and cognitive experience to improve the gaming experience. For this purpose, it is required to determine cognitive elements the user is mostly affected during the game. Physical reactions such as heart rate, breathing and eye movements should also be measured during the game [196]. The primary purpose is to increase the interaction level by using the human sense organs at the maximum level.

Increasing the interaction level is now possible with VR and AR devices. The potential for AR devices in the gaming world and industrial areas such as maintenance lines is relatively high [249]. However, the biggest problem with these devices is the user's needs for compensating cognitive load. The importance of cognitive ergonomics in the designs of VR and AR devices was emphasized by Grajewski et al. [201]. Cognitive loss of individuals in terms of health was examined by Chignell et al. Digital games are designed to measure the mental loss of young and old individuals [198]. Cognitive ergonomics is employed to meet users' needs with different knowledge and experience in VR devices [199]. The use of VR technology and the parameters affecting the perception level were examined to increase the perception levels of 3D models designed in the construction industry [250]. Cognitive interaction in human-machine interaction was discussed within Industry 4.0 and the concept of Operator 4.0 was proposed. The Operator 4.0 concept has been evaluated that the cognitive load of the employees will be higher [155]. An ergonomic index has been defined that allows the

human-robot balance to be quantified in product assembly [214]. The task object identification method (TODD) is proposed for displaying the cognitive states of users [224]. Physical and cognitive ergonomic constraints in interface design in human-machine interaction are investigated [219].

AR is a combination of virtual and physical reality. Cognitive innovations presented in this field have a regulatory effect on the spread of AR [218]. Individuals have cognitive difficulties when using AR devices that are not designed ergonomically. Users make more neck and eye movements to meet their cognitive data needs, which leads to physical discomfort. Considering cognitive ergonomic factors while designing the interface for AR devices also reduces physical discomfort and positively affects user performance [230].

The cognitive load of VR device use in assembly line operator training was analyzed by Brunzini et al. [234]. One of the important parameters is the number of sense organ which the data is transmitted to brain. The number of sense organs was classified by Aristotle as five [251]. Jarrett) reported that there are more than five ways the brain communicates with the environment [252]. The general acceptance about the number of sensory organs is eight, which includes touch, hearing, vision, smell, taste, vestibular, proprioceptive and interceptive systems. The vestibular system transmits the body's balance and movement information to the brain. The proprioceptive system transmits information to the brain about the amount of force required to move an organ. The interceptive system transmits data about what is happening inside the body to the brain. [253]. The main way to increase the satisfaction level of VR and AR device users in the metaverse universe is to reduce the cognitive load of the senses. Today, VR and AR devices transfer all the information to the brain with the senses of hearing, sight and partly touch. This means that a maximum of 3 lanes of the 8-lane highway are used. The representation of the cognitive load coming from the VR and AR devices to the sensory system in the concept of metaverse is presented in Figure 6. In order to spread the concept of metaverse and increase user satisfaction, cognitive load should be allocated to the sensory system correctly.

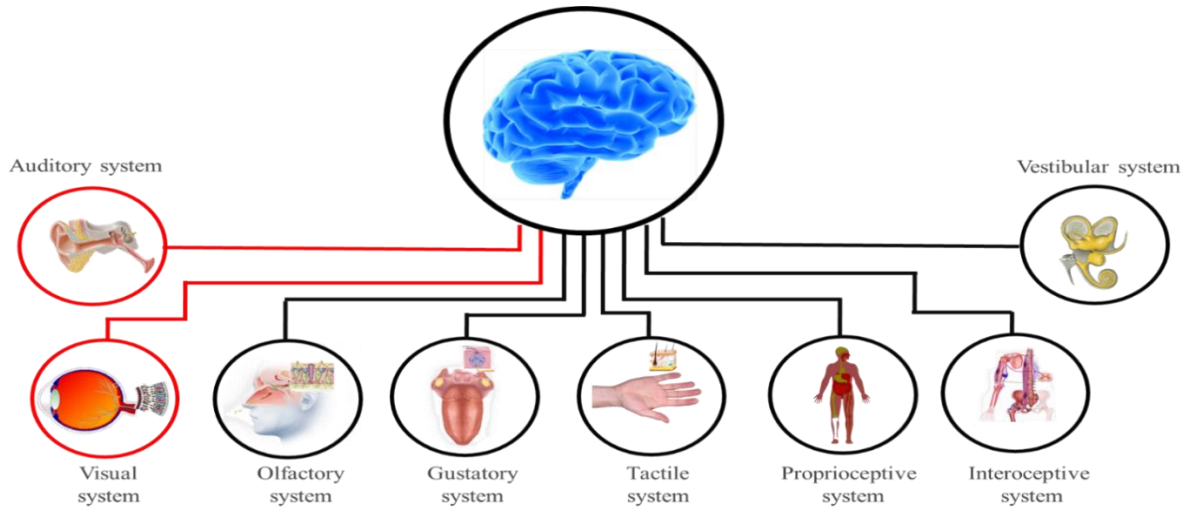


Figure 6. Allocation of cognitive load on transmitter line from sensory system to brain (Duyusal sistemden beyne giden verici hattındaki bilişsel yükün tahsisi)

4.2. Neuroergonomics and Cognitive Ergonomics (Nöroergonomi ve Bilişsel Ergonomi)

Neuroergonomics is a branch of science that aims to design work systems in a safe, effective and usable way by measuring the neural activities of the human brain while working [96]. Neuroergonomics, emerged by integrating neurology and ergonomics, can provide numerical data on the mental fatigue of employee by imaging the human brain while doing any work and measuring the brain waves during work.

The analysis of the brain waves provides a quantitative evaluation of the mental workload of individuals. During all these processes, the sciences of neuroergonomics and cognitive ergonomics interact. Berka et al. used the frequencies of brain waves to measure the workload. Electroencephalography (EEG) measurements of eighty subjects were compared with the workload they felt and the workloads they were actually exposed to. The researchers evaluated the mental workload that the subjects were exposed to while performing arithmetic operations in 2 groups as low and high [72].

Sassaroli et al. (2008) used functional near-infrared marking (fNIRS) method, one of the brain imaging techniques, to determine the level of mental workload and examined the use of neighborhood algorithm. The accuracy rate of the developed method in determining the level of mental workload is between 44% and 72%. Sassaroli et al. (2008) tried to determine whether neuroergonomic methods can be used to measure mental workload [107]. Herff et al. (2014) reported that the prefrontal cortex is related to workload and that measurements

taken with fNIRS work with an accuracy of 78% in determining the workload level [83]. Di Sitali et al. (2015) aimed to reveal the flight procedure complexity of military helicopter pilots with EEG measurements. They tried to determine which flight operations cause more mental fatigue. Researchers stated that intense EEG signals were measured in tasks such as ascent and take-off and lower EEG signals were measured in classical tasks performed during flight exercise and flight [169]. Causse et al. (2016) reported that pilots should evaluate many information together during flight and ignore cognitive noise, which has a disruptive effect on cognition. Especially in terms of auditory noise during flight, they tried to determine how disturbing sounds on the basis of words affect the pilots. Researchers took measurements such as EEG, pupil diameter and analyzed with ANOVA. In experiments conducted with twenty-four people, it was determined how much work memory was affected by stimuli such as disturbing words and false alarms, in addition to normal piloting duties. It has been reported that neuroergonomic methods can be applied in the design of strategic systems by determining the reactions of employees to external environmental stimuli and their level of influence while performing tasks that require attention [148].

Aghajani et al. [69] collected response times and brain signals while performing the n-back task on a computer screen with 17 participants and the measurements were analyzed with ANOVA. The higher "n" in the n-back task, the more working memory is required. Variations in EEG and fNIRS measurements were monitored to prove the theory that the person was mentally fatigued as the study progressed. Borgetti et al. proposed statistical machine learning methods to estimate the operator's

workload from EEG measurements. They collected data from 6 participants 16 times in a laboratory; EEG and eye tracking values were measured. Based on these values, a workload estimation model was developed with the discrete event simulation approach and it has been reported that it is possible to estimate the mental workload [130].

Liu et al. determined the mental workload and stress level of marine team members and determined which team member in which position was exposed to the highest level of workload. The EEG values of mariners were measured while performing different tasks in a ship simulator. It has been determined which of the 4 levels (none, minimum, medium and high) that the mental workload falls into [164]. Kosti et al. examined the brain activities of software engineers while performing two different mentally related tasks with wearable EEG devices. With the multiple regression model, they tried to predict the difficulty experienced by the programmer while trying to understand the code. Ten participants who knew the researchers C programming language were asked to debug twenty code samples with errors interspersed between lines of code. They conducted the study based on the use of wearable EEG to measure the difficulty experienced by the developer while debugging [222]. Di Flumeri et al. developed a method based on EEG measurements to observe the effects of different road and traffic conditions on drivers' workloads. During real driving experiments with 20 young participants, the effect of different traffic conditions on participant mental workload was determined. The mental workload index was proposed for workload level measurement [158]. In other studies, mental workload measurements were taken in the laboratory environment during human-computer interaction [79, 161, 254].

5. CONCLUSIONS AND FUTURE REMARKS (SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR)

Cognitive ergonomics emerged as a new scientific discipline with a rapid acceleration after the development of physical ergonomics reached a certain maturity. Applications making cognitive load of employees sustainable have been developed in different industries. Industrial revolutions (during Industrial Revolution 1.0, 2.0 and 3.0) increased the physical presence of man in the production environment, but when the revolutions reached to a certain stage machine started to replace the physical labor force. Then human beings are employed more as a controller, regulator or designer. As the role of man in production changes, the nature of the strain and fatigue he experiences

has also changed and physical fatigue has left its place to mental fatigue.

Moreover, as the interaction of human with machine and computer increased, different types of problems emerged. While measuring the stress to be experienced, application areas for making designs to reduce fatigues and preventing human errors was also developed. It is clear that this development will make continuous progress in the present and in the future, where time and efficiency are very important from a strategic point of view. From this point of view, it is only possible by a comprehensive literature review to determine the areas of which today's cognitive ergonomics applications will change and develop. In this study, the general tendency of the related literature within the scope of cognitive ergonomics studies and the areas that it has expanded in order to show improvement have been examined through a comprehensive literature review. This research was carried out systematically with certain keywords and 254 studies were examined in depth.

As a result of the research, it is seen that there has been a transition from subjective techniques to objective techniques for the calculation of cognitive workload. Today, studies have begun to determine the levels of fatigue based on the brain waves of the individual/operator while working and this has contributed to the emergence of a new scientific discipline. Similarly, critical studies were carried out to prevent human errors in user interface design and contributed to proactive ergonomic approaches. On the other hand, studies were carried out within the scope of cognitive ergonomics, not only for the blue-collar personnel, but also for both blue-collar and white-collar personnel in the transportation, aerospace, health and defense industries. The general tendency of the literature has been evaluated as the expansion of the application areas of cognitive ergonomics and the emergence of new application areas with triggering mechanisms. Moreover, it is predicted that activities for cognitive ergonomics will develop in a way that will cover completely newly discovered areas such as AR or Metaverse in daily life, as well as production environments triggered by digitalization.

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 ATICI: He conducted the literature review and took part in the writing process of the article.

Literatür araştırmasını yapmış ve makalenin yazım süreçlerinde yer almıştır.

Aylin ADEM: She conducted the literature review and took part in the writing process of the article.

Literatür araştırmasını yapmış ve makalenin yazım süreçlerinde yer almıştır.

Mehmet Burak ŞENOL: He conducted the literature review and took part in the writing process of the article.

Literatür araştırmasını yapmış ve makalenin yazım süreçlerinde yer almıştır.

Metin DAĞDEVİREN: He conducted the literature review and took part in the writing process of the article.

Literatür araştırmasını yapmış ve makalenin yazım süreçlerinde yer almıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Cañas J., Cognitive Ergonomics in Interface Development Evaluation. *Journal of Universal Computer Science*, 14(16) (2008) 2630-2649.
- [2] Andrew Life M., Barber J. Edworthy, Back to the future Cognitive Ergonomics six years on. *Ergonomics*, 39(3) (1996) 341-344.
- [3] Moher D., et al., Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses the PRISMA statement. *Annals of internal medicine*, 151(4) (2009) 264-269.
- [4] Adem A., Dağdeviren M., A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1) (2021) 303-317.

- [5] Adem A., Dağdeviren M., A job rotation-scheduling model for blue-collar employees' hand-arm vibration levels in manufacturing firms. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 31(2) (2021) 174-190.
- [6] Veer G.C et al., Cognitive Ergonomics in Interface Design - Discussion of a Moving Science. *Journal of Universal Computer Science*, 14(16) (2008) 2614-2629.
- [7] Decortis F., Noirfalise S., Saudelli B., Activity theory, cognitive ergonomics and distributed cognition three views of a transport company. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(1) (2000) 5-33.
- [8] Mehta R.K., Integrating Physical and Cognitive Ergonomics. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 4(2-3) (2016) 83-87.
- [9] Murray D.M., et al., Rethinking Cognitive Ergonomics, in *Proceedings of the 31st European Conference on Cognitive Ergonomics*. Association for Computing Machinery BELFAST, United Kingdom, (2019) 36-37.
- [10] Pankok C., et al., The Effect of Physical Workload and Modality of Information Presentation on Cognitive Inhibition in Highly Fit Young Males. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 4(2-3) (2016). 88-103.
- [11] Morton J., The bankruptcy of everyday thinking. *American Psychologist*, 46(1991). 32-33.
- [12] Crandall B., Klein G., Hoffman R.R., Working minds A practitioner's guide to cognitive task analysis. *Working minds, A practitioner's guide to cognitive task analysis.*, Cambridge, MA, US MIT Press. (2006) 332
- [13] Lavie N., Distracted and Confused? Selective Attention Under Load. *Trends in cognitive sciences*, 9 (2005) 75-82.
- [14] Pearson D.G. and Sahraie A., Oculomotor control and the maintenance of spatially and temporally distributed events in visuo-spatial working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A Human Experimental Psychology*, 56A (7) (2003) 1089-1111.

- [15] Venetjoki N., et al., The effect of speech and speech intelligibility on task performance. *Ergonomics*, 49(11) (2006) 1068-1091.
- [16] Cowan N., The magical number 4 in short-term memory a reconsideration of mental storage capacity. *Behav Brain Sci*, 24(1) (2001). 87-114.
- [17] Spence C., Crossmodal attention. *Scholarpedia*, (2010) 5 6309.
- [18] Dunlosky J., et al., Improving Students' Learning With Effective Learning Techniques Promising Directions From Cognitive and Educational Psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1) (2013) 4-58.
- [19] Tversky A. Kahneman D., Judgment under Uncertainty Heuristics and Biases. *Science*, 185 (4157) (1974) 1124-1131.
- [20] Cañas J., et al., Cognitive flexibility and adaptability to environmental changes in dynamic complex problem-solving tasks. *Ergonomics*, 46(5) (2003) 482-501.
- [21] Ericsson K.A. Lehmann A.C., Expert and Exceptional Performance Evidence of Maximal Adaptation to Task Constraints. *Annual Review of Psychology*, 47(1) (1996) 273-305.
- [22] Sluiter J.K., High-demand jobs age-related diversity in work ability? *Applied Ergonomics*, 37(4) (2006) 429-40.
- [23] Endsley M.R., Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1) 1995 32-64.
- [24] Kalakoski V., et al., Effects of a cognitive ergonomics workplace intervention (CogErg) on cognitive strain and well-being a cluster-randomized controlled trial. A study protocol. *BMC Psychology*, 8(1) (2020) 1.
- [25] Biyikli O. Aydogan E.K., Neuroergonomics and Basic Applications. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 3(3) (2015) 173-179.
- [26] Long J., *Cognitive Ergonomics and Human-Computer Interaction*, ed. C. J. Long and A. Whitefield. 1989, Cambridge Cambridge University Press.
- [27] JØRgensen A.H., Thinking-aloud in user interface design a method promoting cognitive ergonomics. *Ergonomics*, (1990) 33(4) 501-507.
- [28] Lawler E.K., Hedge A., Pavlovic-Veselinovic S., Cognitive ergonomics, socio-technical systems, and the impact of healthcare information technologies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(4) (2011) 336-344.
- [29] Hanne T. Trinkaus H.L., Know Cube for MCDM – Visual and Interactive Support for Multicriteria Decision Making. (2003).
- [30] Mohanty, et al., A novel multi-attribute decision making approach for selection of appropriate product conforming ergonomic considerations. *Operations Research Perspectives*, 5 (2018) 82-93.
- [31] Benmoussa K., et al., AHP-based Approach for Evaluating Ergonomic Criteria. *Procedia Manufacturing*, 32 (2019) 856-863.
- [32] Vicente K.J., Mumaw R.J., and Roth E.M., Operator monitoring in a complex dynamic work environment a qualitative cognitive model based on field observations. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(5) (2004) 359-384.
- [33] D tienne F., Burkhardt J.-M., Visser W., Cognitive Effort in Collective Software Design Methodological Perspectives in Cognitive Ergonomics, in *Dans 2nd Workshop on Empirical Software Engineering*, M.C. Catone, Editor. (2003) Italy.
- [34] McCarthy J., Wright P., Cooke M., From information processing to dialogical meaning making an experiential approach to cognitive ergonomics. *Cognition, Technology & Work*, 6(2) (2004) 107-116.
- [35] Hollnagel E., Extended cognition and the future of ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2(3) (2001) 309-315.
- [36] De Keyser V., Can we build a cognitive ergonomics? *Le Travail Humain*, 54(4) (1991). 345-350.
- [37] Eason K.D., Ergonomic perspectives on advances in human-computer interaction. *Ergonomics*, 34(6) (1991) 721-741.
- [38] Venda V.F., Trybus R.J., Venda N.I., *Cognitive Ergonomics Theory, Laws, and*

- Graphic Models. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4(4) (2000) 331-349.
- [39] Blomé M., Johansson C.R., Odenrick P., Visualization of ergonomic guidelines — A comparison of two computer aided systems to support vehicle design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(6) (2006) 571-580.
- [40] Bisantz A. Roth E., Analysis of cognitive work. *Reviews of human factors and ergonomics*, 3(1) (2007) 1-43.
- [41] Bisantz A.M. Burns C.M., Applications of cognitive work analysis. (2008) CRC Press.
- [42] Eraslan E. Dağdeviren M., A Cognitive Approach for Performance Measurement in Flexible Manufacturing Systems using Cognitive Maps, in *Cognitive Maps*, K. Perusich, Editor. (2010), IntechOpen.
- [43] Blakely M.J., Kemp S., Helton W.S., Volitional Running and Tone Counting The Impact of Cognitive Load on Running Over Natural Terrain. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 4(2-3) (2016) 104-114.
- [44] Cullen R.H. Agnew M.J., Comparing Different Measures of Overall Workload in a Multimodal Postural/Auditory Dual-Task Environment. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 4(2-3) (2016) 115-127.
- [45] Ye, T., Pan X., Fatigue, Cognitive Performance, and Subjective Recovery Time Estimation in High-Intensity Work. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 4(2-3) (2016). 141-150.
- [46] Liu Y., Wickens, Mental workload and cognitive task automaticity an evaluation of subjective and time estimation C.D. metrics. *Ergonomics*, 37(11) (1994) 1843-1854.
- [47] Roth E.M., Woods D.D., Pople H.E., Cognitive simulation as a tool for cognitive task analysis. *Ergonomics*, 35(10) (1992) 1163-1198.
- [48] Darses F., Providing practitioners with techniques for cognitive work analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2(3) (2001) 268-277.
- [49] D. St-Maurice, J., Burns C. M., Using cognitive work analysis to compare complex system domains. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 19(5) (2018) 553-577.
- [50] Hoc J.M. Amalberti R., Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1) (2007). 22-55.
- [51] Bodin I. Krupenia S.S., Activity Prioritization to Focus the Control Task Analysis. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 10(1) (2016) 91-104.
- [52] Goh S.K. Coury B.G., Incorporating the effect of display formats in cognitive modelling. *Ergonomics*, 37(4) (1994) 725-745.
- [53] Long J., Cognitive Ergonomics – Past, Present, Future 10 Lessons Learned (10 Lessons Remaining). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(6) (2000). 557-560.
- [54] Yoon W.C., Cognitive Ergonomics in New Territories. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, (2000) 44(6) 564-567.
- [55] Rosenhand H., Roth E., Multer J., Cognitive and Collaborative Demands of Freight Conductor Activities Results and Implications of a Cognitive Task Analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 55(1) (2011) 1884-1888.
- [56] Naikar N., Moylan A., Pearce B., Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis concepts, guidelines and case study for control task analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 7(4) (2006) 371-394.
- [57] Bisantz A.M., et al., Integrating cognitive analyses in a large-scale system design process. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(2) (2003). 177-206.
- [58] Elm W.C., et al., Applied cognitive work analysis A pragmatic methodology for designing revolutionary cognitive affordances. *Handbook of cognitive task design*, (2003) 357-382.

- [59] Cornelissen M., et al., Assessing the 'system' in safe systems-based road designs Using cognitive work analysis to evaluate intersection designs. *Accident Analysis & Prevention*, (2015). 74 324-338.
- [60] Read G.J.M., Salmon M., Lenné M.G, From work analysis to work design A review of cognitive work analysis design applications. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1) (2012) 368-372.
- [61] Stevens N., Salmon P., Safe places for pedestrians Using cognitive work analysis to consider the relationships between the engineering and urban design of footpaths. *Accident Analysis & Prevention*, 72 (2014) 257-266.
- [62] Roth E.M., Uncovering the Requirements of Cognitive Work. *Human Factors*, 50(3) (2008). 475-480.
- [63] Militello L.G., et al., The role of cognitive systems engineering in the systems engineering design process. *Systems Engineering*, 13(3) (2010) 261-273.
- [64] Li Y. Burns C.M., Modeling Automation with Cognitive Work Analysis to Support Human-Automation Coordination. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 11(4) (2017) 299-322.
- [65] Read G.J.M., et al., Designing a ticket to ride with the Cognitive Work Analysis Design Toolkit. *Ergonomics*, 58(8) (2015) 1266-1286.
- [66] Wei J. Salvendy G., Development of a human information processing model for cognitive task analysis and design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 7(4) (2006) 345-370.
- [67] Confer S.M. Batra S., Cognitive Ergonomics for Websites from Concept to Realization. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(4) (2000) 429-432.
- [68] Vicente K.J., Task Analysis, Cognitive Task Analysis, Cognitive Work Analysis What's the Difference? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(9) (1995) 534-537.
- [69] Aghajani H., Garbey M., and Omurtag A., Measuring mental workload with EEG+ fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, (2017) 11 359.
- [70] Albayram Y., et al. The Effects of Risk and Role on Users' Anticipated Emotions in Safety-Critical Systems. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [71] Bagnara S., Marti P., Human work in call centres A challenge for cognitive ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2(3) (2001) 223-237.
- [72] Berka C., et al., EEG correlates of task engagement and mental workload in vigilance, learning, and memory tasks. *Aviation, space, and environmental medicine*,. 78(5) (2007) B231-B244.
- [73] Bhatt R., Ojha A., Indurkha B., Interpretation of Metaphors with Perceptual Features Using WordNet. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [74] Bosse T., Schnitfink K., The Effect of Simulated Threat on Task Performance During Emotion Recognition. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2015). Cham Springer International Publishing.
- [75] Cavallo D., et al., An analytical framework for assessing cognitive capacity and processing speed of operators in industry 4.0. *Procedia Computer Science*, 180 (2021) 318-327.
- [76] Chen J.-G., Jung H.S., Peacock B.J., A fuzzy sets modelling approach for ergonomic workload stress analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 13(3) (1994) 189-216.
- [77] Du X., et al. How Automation Effect Mental Workload of Novice Operators in Space Rendezvous and Docking. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2015). Cham Springer International Publishing.
- [78] Durugbo C.M., Eye tracking for work-related visual search a cognitive task analysis. *Ergonomics*, 64(2) (2021) 225-240.
- [79] Feltman K.A., Bernhardt K.A., Kelley A.M., Measuring the domain specificity of workload using EEG Auditory and visual

- domains in Rotary-Wing simulated flight. *Human Factors*, 63(7) (2021)1271-1283.
- [80] Flad N., et al. System Delay in Flight Simulators Impairs Performance and Increases Physiological Workload. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [81] Gray W.D., Schoelles M.J., Sims C., Cognitive Metrics Profiling. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(12) (2005) 1144-1148.
- [82] Green T.R.G. Hoc J.M., What is cognitive ergonomics? *Le Travail Humain*, 54(4) (1991) 291-304.
- [83] Herff C., et al., Mental workload during n-back task—quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, (2014) 7 935.
- [84] Iqbal B.M., Suzianti A., Nurtjahyo B.. Military Vehicle Dashboard Design Using Semantics Method in Cognitive Ergonomics Framework. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2015). Cham Springer International Publishing.
- [85] Jenkins D., et al. The Development of a Cognitive Work Analysis Tool. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [86] Jenkins D., et al., Using cognitive work analysis to explore activity allocation within military domains. *Ergonomics*, 51(6) (2008) 798-815.
- [87] Jin X., et al. A Method to Estimate Operator's Mental Workload in Multiple Information Presentation Environment of Agricultural Vehicles. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness*. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [88] Kaber D.B. Kim S.-H., Understanding Cognitive Strategy with Adaptive Automation in Dual-Task Performance Using Computational Cognitive Models. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 5(3) (2011) 309-331.
- [89] Kretschmer V., et al. Smart Palletisation Cognitive Ergonomics in Augmented Reality Based Palletising. in *Intelligent Human Systems Integration*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [90] Lagomarsino M., et al., An Online Framework for Cognitive Load Assessment in Industrial Tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, (2022) 102380.
- [91] Li W.-C., et al. The Evaluation of Pilot's First Fixation and Response Time to Different Design of Alerting Messages. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness*. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [92] Liang S.-F.M. Chen C.-W., Modeling Situation Awareness on Alarm Displays in Nuclear Power Plants. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2015). Cham Springer International Publishing.
- [93] Liston M., McDonald N., System Requirements for an Advanced Cockpit to Reduce Workload and Stress. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [94] Liu S., Wadeson A., Nam C.S.. Toward Quantitative Modeling of User Performance in Multitasking Environments. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [95] Liu W., et al. An Analysis of Pilot's Workload Evaluation Based on Time Pressure and Effort. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness*. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [96] Mehta R.K. Parasuraman R., Effects of mental fatigue on the development of physical fatigue a neuroergonomic approach. *Human factors*, 56(4) (2014) 645-656.
- [97] Neerincx M.A., et al. Automatic Feedback on Cognitive Load and Emotional State of Traffic Controllers. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [98] Parlangei O., Caratozzolo M.C., and Guidi S., Multitasking and Mentalizing Machines How the Workload Can Have Influence on the System Comprehension. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.

- Psychology and Cognitive Ergonomics. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [99] Pfeffer S., et al. Estimation of Operator Input and Output Workload in Complex Human-Machine-Systems for Usability Issues with iFlow. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Understanding Human Cognition. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [100] Putri M., Yang X., Kim J.H., Sensitivity, Bias, and Mental Workload in a Multitasking Environment. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [101] Qiu, J. Han T., Integrated Model for Workload Assessment Based on Multiple Physiological Parameters Measurement. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [102] Radüntz T., A New Method for Mental Workload Registration. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [103] Radüntz T., Neuronal Mental Workload Registration during Execution of Cognitive Tasks. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [104] Ruf C., Stütz P., Model-Driven Payload Sensor Operation Assistance for a Transport Helicopter Crew in Manned–Unmanned Teaming Missions Assistance Realization, Modelling Experimental Evaluation of Mental Workload. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [105] Salmon P., et al., Hierarchical task analysis vs. cognitive work analysis comparison of theory, methodology and contribution to system design. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 11(6) (2010) 504-531.
- [106] Sarter N., Sarter M., Neuroergonomics Opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 4(1-2) (2003) 142-150.
- [107] Sassaroli A., et al., Discrimination of mental workload levels in human subjects with functional near-infrared spectroscopy. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 1(02) (2008) 227-237.
- [108] Stevens N.J. Salmon M., New Knowledge for Built Environments Exploring Urban Design from Socio-technical System Perspectives. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2015). Cham Springer International Publishing.
- [109] Sumner T., N. Bonnardel, Kallak B.H., The cognitive ergonomics of knowledge-based design support systems, in Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems., Association for Computing Machinery Atlanta, Georgia, USA. 199783–90.
- [110] Truschzinski M., Valtin G., Müller N.H., Investigating the Influence of Emotion in Air Traffic Controller Tasks Pretest Evaluation. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [111] Wei Z., et al. A Theoretical Model of Mental Workload in Pilots Based on Multiple Experimental Measurements. in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [112] Wu H.-C., Lee C.-L., Lin C.-T., Ergonomic evaluation of three popular Chinese e-book displays for prolonged reading. International Journal of Industrial Ergonomics, (2007) 37(9) 761-770.
- [113] Zhang X., et al. Can Fixation Frequency Be Used to Assess Pilots' Mental Workload During Taxiing? in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Performance, Emotion and Situation Awareness. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [114] Alyan E., et al., Workplace design-related stress effects on prefrontal cortex connectivity and neurovascular coupling. Applied Ergonomics, 96 (2021) 103497.
- [115] Czerniak J.N., Brandl C., Mertens A., Designing human-machine interaction concepts for machine tool controls regarding ergonomic requirements. IFAC-PapersOnLine, 50(1) (2017) 1378-1383.

- [116] Faber M., Bützler J., Schlick C.M., Human-robot Cooperation in Future Production Systems Analysis of Requirements for Designing an Ergonomic Work System. *Procedia Manufacturing*, 3(2015) 510-517.
- [117] Hartono B., Saputra B.A., Are the Experts Really Experts? a Cognitive Ergonomics Investigation for Project Estimations. *Jurnal Teknik Industri*, 14(2) (2012) 115-122
- [118] Hollnagel E., Cognitive ergonomics and the reliability of cognition. *Le Travail Humain*, 54(4) (1991) 305-321.
- [119] Jenkins D., et al., Cognitive work analysis coping with complexity. (2017) CRC Press.
- [120] Kim J.H., The Impact of Metacognitive Monitoring Feedback on Mental Workload and Situational Awareness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [121] Read G.J.M., et al., Using cognitive work analysis to identify competencies for human factors and ergonomics practitioners. *Ergonomics*, 65(3) (2022) 348-361.
- [122] Schulte A., et al. A Heterarchical Urgency-Based Design Pattern for Human Automation Interaction. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [123] Song B., et al. A Multidimensional Workload Assessment Method for Power Grid Dispatcher. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [124] Sun R., et al. Task-Load Evaluation Method for Maintenance Personnel Based on the JACK Simulation. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [125] Teng X., et al. The Identification of Human Errors in the Power Dispatching Based on the TRACER Method. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [126] Wang Q., et al. Ergonomic Evaluation Study of Occupant Function Allocation for Riot Vehicle Based on Task Load. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [127] Zheng B., et al. Effect of Different Information Push Mechanism on Driver's Situation Awareness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [128] Abe K., et al. Automatic Classification of Eye Blink Types Using a Frame-Splitting Method. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Understanding Human Cognition. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [129] Ericson K.A.E., Lehmann A.C., Expert and Exceptional Performance Evidence of Maximal Adaptation to Task Constraints. *Annual Review of Psychology*, 47(1) (1996) 273-305.
- [130] Borghetti B.J., Giametta J.J., Rusnock C.F., Assessing continuous operator workload with a hybrid scaffolded neuroergonomic modeling approach. *Human factors*, 59(1) (2017) 134-146.
- [131] Dzaack J. Urbas L., Cognitive Model Data Analysis for the Evaluation of Human Computer Interaction. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [132] Feng J., Spence I., Effects of Cognitive Training on Individual Differences in Attention. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [133] Ferrari V., et al. Psycho-Physiological Evaluation of the Pilot A Study Conducted with Pilots of the French Air Force. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [134] Hong S.-K. Ryu S., Human Performance Model for Combined Steering-Targeting Tasks. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [135] Kang, S.H., J. Lee, and S. Jin, Effect of standing desk use on cognitive performance and physical workload while engaged with high cognitive demand tasks. *Applied Ergonomics*, 92 (2021). 103306.
- [136] Kreutzfeldt M., Renker, J., Rinkenauer G., The Attentional Perspective on Smart Devices Empirical Evidence for Device-Specific Cognitive Ergonomics. in *Advances in*

- Ergonomics in Design. (2019). Cham Springer International Publishing.
- [137] Lind M., Sundvall H., Time Estimation as a Measure of Mental Workload. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [138] Miyake S., et al. Multidimensional Evaluation of Human Responses to the Workload. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [139] Tajri I., Cherkaoui A., Benchekroun T.H., The impact of TLE on employees' stress and performance and role of cognitive ergonomics in reducing lean's stressors. in *Proceedings of (2013) International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. (2013).
- [140] Volz K.M., Dorneich M.C., Evaluation of Cognitive Skill Degradation in Flight Planning. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 14(4) (2020) 263-287.
- [141] Wang C., et al. Modeling and Simulating Astronaut's Performance in a Three-Level Architecture. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [142] Alfredson J., et al. Applied Cognitive Ergonomics Design Principles for Fighter Aircraft. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [143] Bridger R.S., et al., Job strain related to cognitive failure in naval personnel. *Ergonomics*, 53(6) (2010) 739-747.
- [144] Gempton N., et al. Autonomous Control in Military Logistics Vehicles Trust and Safety Analysis. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Applications and Services*. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [145] Horn A., Li W.-C., Braithwaite G., Human-Centered Design of Flight Mode Annunciation for Instantaneous Mode Awareness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [146] Li Y., et al. Inter-sector Backup Behaviors in Parallel Approach ATC The Effect of Job Satisfaction. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [147] Stanton N.A. McIlroy R.C., Designing mission communication planning the role of Rich Pictures and Cognitive Work Analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13(2) (2012) 146-168.
- [148] Causse M., Peysakhovich V., Fabre E.F., High working memory load impairs language processing during a simulated piloting task an ERP and pupillometry study. *Frontiers in human neuroscience*, 10 (2016) 240.
- [149] Correia W., et al., The methodological involvement of the emotional design and cognitive ergonomics as a tool in the development of children products. *Work*, 41(2012) 1066-1071.
- [150] Dong X. Hayes C.C., Using Uncertainty to Inform Information Sufficiency in Decision Making. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [151] Karwowski W., Cognitive Ergonomics; Requisite Compatibility, Fuzziness and Nonlinear Dynamics. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, (2000) 44(6) 580-583.
- [152] Kim J.H., et al. Developing Metacognitive Models for Team-Based Dynamic Environment Using Fuzzy Cognitive Mapping. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Understanding Human Cognition*. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [153] Oyekan J., et al., Applying a fusion of wearable sensors and a cognitive inspired architecture to real-time ergonomics analysis of manual assembly tasks. *Journal of Manufacturing Systems*, 61(2021) 391-405.
- [154] Peter T., et al., Information presentation in manual assembly a cognitive ergonomics analysis. (2017).
- [155] Zolotová I., et al., Smart and cognitive solutions for Operator 4.0 Laboratory H-CPPS case studies. *Computers & Industrial Engineering*, 139 (2020) 105471.

- [156] Adriaensen A, et al., A socio-technical analysis of functional properties in a joint cognitive system a case study in an aircraft cockpit. *Ergonomics*, 62(12) (2019) 1598-1616.
- [157] Crawford, E.G., Toft Y., Kift R.L., Attending to Technology Adoption in Railway Control Rooms to Increase Functional Resilience. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [158] Di Flumeri, G., et al., EEG-based mental workload neurometric to evaluate the impact of different traffic and road conditions in real driving settings. *Frontiers in human neuroscience*, (2018) 509.
- [159] Diederichs J.F., et al. New HMI Concept for Motorcycles–The Saferider Approach. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2009). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [160] Dunbar J. Gilbert J.E., The Human Element in Autonomous Vehicles. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Cognition and Design*. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [161] Foy H.J., Runham P., Chapman P., Prefrontal cortex activation and young driver behaviour a fNIRS study. *PLoS one*, 11(5) (2016). e0156512.
- [162] Hachisuka S., et al. Facial Expression Measurement for Detecting Driver Drowsiness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [163] Labiale G., Cognitive Ergonomics and Intelligent Systems in the Automobile, in *Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces*, Y.I. Noy, Editor. 1997, CRC Press.
- [164] Liu Y., et al. EEG-based Mental Workload and Stress Recognition of Crew Members in Maritime Virtual Simulator A Case Study. in *CW*. (2017).
- [165] Masuda T., et al. The Influence of False and Missing Alarms of Safety System on Drivers' Risk-Taking Behavior. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [166] Rahman F., Amin B., Parvez M., Application of AHP in Development of Multi-Criteria Ergonomic Approach for Choosing the Optimal Alternative for Material Handling- A Case Study and Software Development to Facilitate AHP Calculation. *International Journal of Engineering Research & Technology* (2014) 3(6).
- [167] Walker, G.H., Stanton N.A., Young M.S., An On-Road Investigation of Vehicle Feedback and Its Role in Driver Cognition Implications for Cognitive Ergonomics. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(4) (2001) 421-444.
- [168] Zheng Y., Zhao G., Natural Interaction in Video Image Investigation and Its Evaluation. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [169] Di Stasi L.L., et al., Task complexity modulates pilot electroencephalographic activity during real flights. *Psychophysiology*, 52(7) (2015) 951-956.
- [170] Kistan T., Gardi A., Sabatini R., Machine Learning and Cognitive Ergonomics in Air Traffic Management Recent Developments and Considerations for Certification. *Aerospace*, 5(4) (2018) 103.
- [171] Li W.-C., et al. The Evaluation of Pilot's Situational Awareness During Mode Changes on Flight Mode Annunciators. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [172] Lintern G., The Airspace as a Cognitive System. *The International Journal of Aviation Psychology*, 21(1) (2011) 3-15.
- [173] McDonald N., et al. Proactive Safety Performance for Aviation Operations. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [174] Wang L., et al. A Novel Approach for Comprehensive Evaluation of Flight Deck Ergonomic Design Delphi-Order Relation Analysis (ORA) Method and Improved Radar Chart. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2016). Cham Springer International Publishing.

- [175] Wu X., et al. How Shared Screen Affected Team Collaboration Task, A Case Study of Ergonomics Experiment on Team Situation Awareness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [176] Wu X., et al. Pilot Situational Awareness Modeling for Cockpit Interface Evaluation. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [177] Burns C.M., Enomoto Y., Momtahan K., A cognitive work analysis of cardiac care nurses performing teletriage, in *Applications of cognitive work analysis*. (2016), CRC Press. 163-188.
- [178] Despont-Gros C., et al., Acceptance and cognitive load in a clinical setting of a novel device allowing natural real-time data acquisition. *International Journal of Medical Informatics*. 76(11) (2007) 850-855.
- [179] Effken J.A., et al., Using Cognitive Work Analysis to fit decision support tools to nurse managers' work flow. *International Journal of Medical Informatics*, 80(10) (2011). 698-707.
- [180] Lee G.I., et al., Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries. *Surgical Endoscopy*, 28(2) (2014) 456-465.
- [181] Lopez K.D., et al., Cognitive work analysis to evaluate the problem of patient falls in an inpatient setting. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 17(3) (2010) 313-321.
- [182] Webster C.S. Weller J.M., Data visualisation and cognitive ergonomics in anaesthesia and healthcare. *British Journal of Anaesthesia*, 126(5) (2021) 913-915.
- [183] Wung S.-F. M.R. Schatz, Critical Care Nurses' Cognitive Ergonomics Related to Medical Device Alarms. *Critical care nursing clinics of North America*, 30(2) (2018). 191-202.
- [184] Brown T., Moeckli J., Marshall D., Use of High-Fidelity Simulation to Evaluate Driver Performance with Vehicle Automation Systems. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2009). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [185] Cahill J., et al. HILAS Flight Operations Research Development of Risk/Safety Management, Process Improvement and Task Support Tools. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [186] Coelho D.A., Cognitive Engineering and Emergency Management. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Understanding Human Cognition*. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [187] Hollnagel E., Cognitive ergonomics it's all in the mind. *Ergonomics*, 40(10) (1997) 1170-1182.
- [188] Larsson P., Tingvall C., The Safe System Approach – A Road Safety Strategy Based on Human Factors Principles. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Applications and Services*. (2013). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [189] Champagne, M.A., Effect of Automation Level on Cognitive Workload when Collaborating with a Robotic Assistant. (2022).
- [190] Gamboa P, et al., Attention Classification Based on Biosignals during Standard Cognitive Tasks for Occupational Domains. *Computers*, 11(4) (2022) 49.
- [191] Johnsen S.O., Kilskar S.S., Fossum K.R., Missing focus on Human Factors – organizational and cognitive ergonomics – in the safety management for the petroleum industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O Journal of Risk and Reliability*, 231(4) (2017) 400-410.
- [192] Lee J.D., Emerging challenges in cognitive ergonomics Managing swarms of self-organizing agent-based automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2(3) (2001) 238-250.
- [193] Pinheiro S., et al., Ergonomics and Safety in the Design of Industrial Collaborative Robotics, in *Occupational and Environmental Safety and Health III*, M. Arezes, et al., Editors. (2022), Springer International Publishing Cham. 465-478.

- [194] Akkari A.C.S., da Rocha M.F.M., R.F. de Farias Novaes. Cognitive Ergonomics and the Industry 4.0. in Proceedings of the 3rd Brazilian Technology Symposium. (2019). Cham Springer International Publishing.
- [195] Barber P and Laws J., Editorial Cognitive ergonomics empowering designers and users? *Ergonomics*, 37(11) (1994) 1749-1752.
- [196] Chamberland C., et al., A Cognitive and Affective Neuroergonomics Approach to Game Design. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 59(1) (2015) 1075-1079.
- [197] Chevalier A., Kicka M., Web designers and web users Influence of the ergonomic quality of the web site on the information search. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(10) (2006). 1031-1048.
- [198] Chignell M.H., et al., Can Cognitive Assessment Games Save Us from Cognitive Decline? Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care, 10(1) (2021) 7-12.
- [199] Ciccone B.A., Bailey S.K.T., Lewis J.E., The Next Generation of Virtual Reality Recommendations for Accessible and Ergonomic Design. *Ergonomics in Design*, (2021) 10648046211002578.
- [200] D'Addona D.M., et al., Adaptive automation and human factors in manufacturing an experimental assessment for a cognitive approach. *CIRP Annals*, 67(1) (2018) 455-458.
- [201] Grajewski D., et al., Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces. *Procedia Computer Science*, 25 (2013) 289-301.
- [202] Hacker W., Improving engineering design-contributions of cognitive ergonomics. *Ergonomics*, 40(10) (1997)1088-1096.
- [203] Hu B., et al., Predicting real-world ergonomic measurements by simulation in a virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1) (2011) 64-71.
- [204] Jeong S., Jung E.S., and Im Y., Ergonomic evaluation of interaction techniques and 3D menus for the practical design of 3D stereoscopic displays. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53 (2016) 205-218.
- [205] Kadefors R., Forsman M., Ergonomic evaluation of complex work a participative approach employing video-computer interaction, exemplified in a study of order picking. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25(4) (2000) 435-445.
- [206] Kolski C., Formalization Approaches of Ergonomic Knowledge for "Intelligent" Design, Evaluation and Management of Man-Machine Interface in Process Control. *IFAC Proceedings Volumes*, 25(6) (1992) 175-180.
- [207] O'B Holt, et al., Immersive Virtual Reality In Cable and Pipe Routing Design Metaphors and Cognitive Ergonomics. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(3) (2004) 161-170.
- [208] Sun G., Yao S., Carretero J.A., Comparing Cognitive Efficiency of Experienced and Inexperienced Designers in Conceptual Design Processes. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 8(4) (2014) 330-351.
- [209] Tong T., et al., Improving the Ergonomics of Cognitive Assessment with Serious Games. Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care, 4(1) (2015) 1-5.
- [210] Almeida, V.M., S. Rafael, and M. Neves. Natural Human-Computer Interfaces' Paradigm and Cognitive Ergonomics. in *Advances in Ergonomics in Design*. (2020). Cham Springer International Publishing.
- [211] Coomans S. Lacerda G.S., PETESE, a Pedagogical Ergonomic Tool for Educational Software Evaluation. *Procedia Manufacturing*, 3 (2015) 5881-5888.
- [212] Czerniak J.N., et al., The Index of Cognitive Activity - Eligibility for task-evoked informational strain and robustness towards visual influences. *Applied Ergonomics*, 92 (2021) 103342.
- [213] Deng L., G. Wang, and S. Yu, Layout design of human-machine interaction interface of cabin based on cognitive ergonomics and GA-ACA. *Intell. Neuroscience*, (2016) 2.
- [214] Dimitrokalli A., et al., On the assessment of human-robot collaboration in mechanical product assembly by use of Virtual Reality. *Procedia Manufacturing*, 51(2020) 627-634.

- [215] Falzon P., Cognitive Ergonomics. Understanding, Learning, and Designing Human-Computer Interaction, ed. B. Gaines and A. Monk. 1990, London Academic Press.
- [216] Franks M. Briggs P., Use of a cognitive ergonomics approach to compare usability of a multidose dry powder inhaler and a capsule dry powder inhaler an open-label, randomized, controlled study. *Clinical Therapeutics*, 26(11) (2004) 1791-1799.
- [217] Gao Y., et al. Operational Decision Making in Aluminium Smelters. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2009). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [218] Huang T.-L., Liao S., A model of acceptance of augmented-reality interactive technology the moderating role of cognitive innovativeness. *Electronic Commerce Research*, 15(2) (2015) 269-295.
- [219] Johnson C.W., Impact of working environments upon human-machine dialogues a formal logic for the integrated specification of physical and cognitive ergonomic constraints on user interface design. *Ergonomics*, 39(3) (1996) 512-530.
- [220] Kalakoski V., et al., Cognitive ergonomics for data analysis. Experimental study of cognitive limitations in a data-based judgement task. *Behaviour & Information Technology*, 38(10) (2019) 1038-1047.
- [221] Kolski C., Millot P., A rule-based approach to the ergonomic “static” evaluation of man-machine graphic interface in industrial processes. *International Journal of Man-Machine Studies*, 35(5) (1991) 657-674.
- [222] Kosti M.V., et al., Towards an affordable brain computer interface for the assessment of programmers’ mental workload. *International Journal of Human-Computer Studies*, 115 (2018). 52-66.
- [223] Laws J.V. Barber J., Video analysis in cognitive ergonomics a methodological perspective. *Ergonomics*, (1989) 32(11) 1303-1318.
- [224] Mahfoudhi A., Abed M., Angué J.C., TOOD Task object-oriented description for ergonomic interfaces specification, in *Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems* (1995), T.B. Sheridan, Editor. 1995, Pergamon Oxford. 641-646.
- [225] Mlilo, S. Thatcher A., Mental Models Have Users’ Mental Models of Web Search Engines Improved in the Last Ten Years? in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2011). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [226] Patrick J., et al. Designing the Interface to Encourage More Cognitive Processing. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [227] Qian C., et al., Affective Recognition Using EEG Signal in Human-Robot Interaction. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2018). Cham Springer International Publishing.
- [228] Rodrigues M., et al., Cognitive-ergonomics and instructional aspects of e-learning courses. *Work*, 41 (2012) 5684-5685.
- [229] Savioja P., et al. Defining a Work Support and Training Tool for Automation Design Engineers. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2007). Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- [230] Singh A., et al., A comparative evaluation of the wearable augmented reality-based data presentation interface and traditional methods for data entry tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 86 (2021) 103190.
- [231] Taylor, G., Natural, Multi-modal Interfaces for Unmanned Systems. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Cognition and Design*. (2017). Cham Springer International Publishing.
- [232] Wu C. Liu Y., Development and evaluation of an ergonomic software package for predicting multiple-task human performance and mental workload in human-machine interface design and evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1) (2009) 323-333.
- [233] Anderson, J.R., et al., An integrated theory of the mind. *Psychol Rev*, 111(4) (2004) 1036-60.
- [234] Brunzini, A., et al., Virtual training for assembly tasks a framework for the analysis of the cognitive impact on operators. *Procedia Manufacturing*, 55 (2021) 527-534.

- [235] Chen M., Fadel G., Mata I., Applications of affordance and cognitive ergonomics in virtual design A digital camera as an illustrative case. *Concurrent Engineering*, 30(1) (2022) 5-20.
- [236] Conradi J., Alexander T., Analysis of Visual Performance during the Use of Mobile Devices While Walking. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [237] Jo D., Lee S., Lee Y., The Effect of Driving Speed on Driver's Visual Attention Experimental Investigation. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [238] Métayer N., Coeugnet S., Improving the experience in the pedestrian's interaction with an autonomous vehicle an ergonomic comparison of external HMI. *Applied Ergonomics*, 96 (2021) 103478.
- [239] Rodriguez Aguiñaga A., et al., Cognitive Ergonomics Evaluation Assisted by an Intelligent Emotion Recognition Technique. *Applied Sciences*, 10(5) (2020). 1736.
- [240] Scheer M., et al. The Influence of Visualization on Control Performance in a Flight Simulator. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2014). Cham Springer International Publishing.
- [241] Tian Y., et al., What affects gait performance during walking while texting? A comparison of motor, visual and cognitive factors. *Ergonomics*, 61(11) (2018) 1507-1518.
- [242] White, A.R., Human expertise in the interpretation of remote sensing data A cognitive task analysis of forest disturbance attribution. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74 (2019) 37-44.
- [243] Wang L. Ren Y., A Complex Perspective of System Situation Awareness. in *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. (2016). Cham Springer International Publishing.
- [244] Bababeipouya A., Using CREAM techniques for investigating human error with cognitive ergonomics approach in the control room of cement industry. *IJBPA4*, (2015) 1480-1484.
- [245] Pfeffer S., et al., Cognitive Ergonomics and Informatory Load in Anesthesia. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 57 (2012) 947-950.
- [246] Jiancaro T., Jamieson G.A., Mihailidis A., Twenty Years of Cognitive Work Analysis in Health Care A Scoping Review. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 8(1) (2013) 3-22.
- [247] Read G.J.M., et al., Using cognitive work analysis to identify competencies for human factors and ergonomics practitioners. *Ergonomics*, (2021) 1-14.
- [248] Hoc J.M., Cognitive ergonomics a multidisciplinary venture. *Ergonomics*, 51(1) (2008) 71-75.
- [249] Ariansyah D., et al., A head mounted augmented reality design practice for maintenance assembly Toward meeting perceptual and cognitive needs of AR users. *Applied Ergonomics*, 98(2022). 103597.
- [250] Paes D., Irizarry J., Pujoni D., Evidence of cognitive benefits from immersive design review Comparing three-dimensional perception and presence between immersive and non-immersive virtual environments. *Automation in Construction*, 130(2021) 103849.
- [251] Johansen, T.K., Aristotle on the Sense-Organs. 1997 Cambridge University Press
- [252] Jarrett C., *Great Myths of the Brain*. (2014) Wiley-Blackwell.
- [253] Moller A.R., *Sensory Systems Anatomy, Physiology and Pathophysiology*. (2003) London Elsevier.
- [254] Adem A., Çakıt E., Dağdeviren M., A Literature Search on Neuroergonomics Studies. *Ergonomi (Online)*, 2(2) (2019) 131-136.

Değişken Sayıda Delikler İçeren Emici Plakalara Sahip Güneş Enerjili Hava Isıtıcısının Sayısal Analizi

Murat ÖZTÜRK^{1,2} , Erdem ÇİFTÇİ^{3*} 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/11/2023
Düzeltilme: 06/12/2023
Kabul: 07/12/2023

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi
Hesaplamalı Akışkanlar
Dinamiği
Emici Plaka
Hava Isıtıcı
Isıl Sistemler

Article Info

Research article
Received: 25/11/2023
Revision: 06/12/2023
Accepted: 07/12/2023

Keywords

Solar Energy
Computational Fluid
Dynamics
Absorber Plate
Air Heater
Thermal Systems

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada güneş enerjisinden ısı enerji elde etmek amacıyla kullanılan güneş enerjili hava ısıtıcıların performansının artırılması amaçlanmış ve farklı emici yüzeylere sahip güneş enerjili hava ısıtıcısı modelleri geliştirilerek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı ile sayısal analizler yapılmıştır. / In this study, it is aimed to increase the performance of solar air heaters used to obtain thermal energy from solar energy, and solar air heater models with different absorber surfaces were developed and numerical analyzes were carried out with the Computational Fluid Dynamics (CFD) approach.

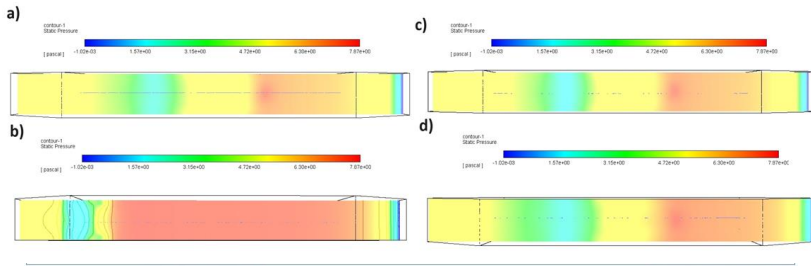


Figure A: Temperature distributions of the absorber plate with (a) flat, (b) four, (c) six and (d) eight holes / Şekil A: (a) Düz, (b) dört, (c) altı ve (d) sekiz delikli emici plakaya ait sıcaklık dağılımları

Önemli noktalar (Highlights)

- Geleneksel düz emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcısı ve farklı sayıda delikler içeren güneş enerjili hava ısıtıcıları modellenmiştir. / A conventional plain absorber plate solar air heater and solar air heaters with different numbers of holes are modeled.
- Sıcaklık, basınç ve hız dağılımları incelenmiştir. / Temperature, pressure and velocity distributions were examined.
- Kolektör giriş ve çıkış noktası arasındaki sıcaklık farkları düz plakalı, dört delikli, altı delikli ve sekiz delikli model için sırasıyla 12,6°C, 10°C, 13,5°C ve 16,2°C olarak elde edilmiştir. / The temperature differences between the collector inlet and exit point were obtained as 12.6°C, 10°C, 13.5°C and 16.2°C for the plain, four-hole, six-hole and eight-hole models, respectively.

Amaç (Aim): Güneş enerjili hava ısıtıcı emici plaka geometrisinin performansa etkisi araştırılmıştır. / The effect of solar air heater absorber plate geometry on performance was investigated.

Özgünlük (Originality): Sıralı düzende farklı sayılarda delikler içeren emici plakalar oluşturulmuştur. / Absorber plates containing different numbers of holes in a sequential order were generated.

Bulgular (Results): Kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki en büyük farkın 16,2°C olduğu belirlenmiştir. / It was determined that the maximum difference between collector inlet and exit temperatures was 16.2°C.

Sonuç (Conclusion): Artan delik sayısı ile sistem performansının arttığı, deliklerin türbülans etkisi yaratarak ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. / It was observed that the system performance increased with increasing number of holes, and the holes significantly improved heat transfer by creating a turbulence effect.



Değişken Sayıda Delikler İçeren Emici Plakalara Sahip Güneş Enerjili Hava Isıtıcısının Sayısal Analizi

Murat ÖZTÜRK^{1,2} , Erdem ÇİFTÇİ^{3*} 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/11/2023
Düzeltilme: 06/12/2023
Kabul: 07/12/2023

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi
Hesaplamalı Akışkanlar
Dinamiği
Emici Plaka
Hava Isıtıcı
Isıl Sistemler

Öz

Dünya nüfusundaki meydana gelen artışlar, enerjiye olan talepleri de doğrudan etkilemektedir. Nüfus artışı ile doğrudan etkilenen enerji taleplerine karşı tepki verebilmek ve sürdürülebilir bir gelecek sağlamak amacıyla farklı enerji kaynakları arayışları ortaya çıkmaktadır. Son zamanlarda popüler bir hale gelen yenilenebilir enerji kaynaklarının en temeli olan güneş enerjisinden elektrik üretimi ve ısı uygulamaları ilerlemeye devam etmektedir. Bu çalışmada güneş enerjisinden ısı enerji elde etmek amacıyla kullanılan güneş enerjili hava ısıtıcıların performansının artırılması amaçlanmış ve farklı emici yüzeylere sahip güneş enerjili hava ısıtıcısı modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan bu modellerin analizleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Başlangıçta geleneksel düz emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcısı modellenmiştir. Daha sonra düz plakaya sırasıyla dört, altı ve sekiz adet delikler eklenmiş ve aynı şartlar altında sistem analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizler sonucu benzer oranlarda basınç düşüşleri görülmüş ve hava akış hızları oldukça yakın oranda azalmıştır. Bunun yanı sıra giriş ve çıkış noktası arasındaki sıcaklık farkları düz plakalı, dört delikli, altı delikli ve sekiz delikli model için sırasıyla 12,6°C, 10°C, 13,5°C ve 16,2°C olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak delik sayısı ile sistem performansında artışı ve oluşturulan deliklerin türbülans etkisi yaratarak ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Numerical Analysis of a Solar Air Heater with Absorber Plates Containing a Variable Number of Holes

Article Info

Research article
Received: 25/11/2023
Revision: 06/12/2023
Accepted: 07/12/2023

Keywords

Solar Energy
Computational Fluid
Dynamics
Absorber Plate
Air Heater
Thermal Systems

Abstract

Increases in the world population directly affect the demands for energy. There is a search for different energy sources in order to respond to energy demands that are directly affected by population growth and to ensure a sustainable future. Electricity production and thermal applications from solar energy, the most basic of renewable energy sources that have become popular recently, continue to progress. In this study, it was aimed to increase the performance of solar air heaters used to obtain thermal energy from solar energy, and solar air heater models with different absorbent surfaces were developed. The analyzes of these developed models were carried out with the Computational Fluid Dynamics (CFD) approach and the results were evaluated. Initially, a conventional flat absorber plate solar air heater was modeled. Then, four, six and eight holes were added to the flat plate, respectively, and system analyzes were carried out under the same conditions. As a result of these analyzes, pressure drops at similar rates were observed and air flow rates decreased at a very similar rate. In addition, the temperature differences between the inlet and outlet points were obtained as 12.6°C, 10°C, 13.5°C and 16.2°C for the flat plate, four-hole, six-hole and eight-hole model, respectively. Based on the results obtained, it has been observed that the system performance increases with the number of holes and that the holes created significantly improve heat transfer by creating a turbulence effect.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel gelişmelerin hızla artması sonucu enerjiye olan talepler de hızla artış göstermektedir. Güncel olarak kullanılmakta olan fosil yakıtların

hem zararlı gazlar ortaya çıkarması hem de tükenme tehlikesi ile karşı karşıya kalması farklı enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmakta ve çeşitli arayışları ortaya çıkarmaktadır. Yenilenebilir enerji

sektörünün hızla artışı, aktif enerji kaynaklarına destek olabilmekte ve temiz enerji kaynakları olması gibi pek çok olumlu sonuçlar sunmaktadır. Bu anlamda yenilenebilir enerji kaynaklarının en temeli olan Güneş enerjisinden pek çok alanda faydalanılmaktadır ve gerek elektrik üretimi gerekse de ısıl işlemlerde oldukça yaygınlaşmaktadır. Isıl uygulama sistemlerinin en temeli olan güneş hava ısıtıcılarının da performansı temel nokta olmakta ve bu alanda pek çok çalışma yapılmaktadır. Alıç ve ark. (2021), güneş hava ısıtıcılarının performansını geliştirmek için 4 farklı emici plaka modeli içeren (düz plaka, das modeli, geliştirilmiş das modeli ve Z tipi) bir çalışma yapmışlardır. Hem deneysel hem de sayısal olarak yaptıkları bu çalışmada maksimum performansı Z tipi emici plakaya sahip sistemden elde etmişler ve ortalama %78 verim elde ettiklerini belirtmişlerdir [1]. Ammar ve ark. (2022), düz plakalı güneş hava ısıtıcısının performansında iyileşme elde edebilmek amacıyla plaka yüzeyine dikdörtgen kanatçıklar entegre etmişler ve sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler doğrultusunda kanatçıkların ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve verimin %47'den %80'e arttırıldığını belirtmişlerdir [2]. Embiale ve Gunjo (2023), parafin bazlı ısı depolama malzemesine sahip çift akışlı bir güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirmişler ve hem deneysel hem de sayısal analizlerini yapmışlardır. Yaptıkları sayısal analizlerin sonucunda hava akış hızı arttıkça hava çıkış sıcaklığının azaldığını elde etmişlerdir [3]. Maurya ve ark. (2023), borulu üç geçişli bir güneş enerjili hava ısıtıcısının performansını deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada yeni bir tip emici plaka önermişler, bu emici plaka akış boyunca 5 tüp içerdiğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda maksimum verimi 0,006 kg/s akış hızında %60,04 olarak belirtmişlerdir [4]. Iqbal ve ark. (2023), Güneş enerjili hava ısıtıcılarının performansında artış sağlamak için yeni bir emici plaka geometrisi sunmuşlar ve sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu model V-nervür tipindeki kanatçıkları içermekte ve V modellerinin açılarını 30° ile 75° arasında değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda Re sayısının 18000 olduğu sistemde 1,92 olarak en yüksek termal hidrolik performans elde ettiklerini ve Nu sayısında 3,36 kadar artış sağladıklarını belirtmişlerdir [5]. Raturi ve ark. (2024), çift akışlı V-tipi kanatçıklara sahip güneş enerjili hava ısıtıcısı modeli geliştirmişler ve sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizlerin doğrultusunda maksimum performans, 0,2 kg/s akış hızında, emici plakanın her iki tarafında da yönlendirici yer alan sistemden elde edildiğini

bildirmişlerdir [6]. Choi ve Choi (2023), ısı pompasının performansını arttırmak için emici yüzeyine üçgen bloklar entegre edilmiş bir güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirilmiş ve ısı pompasına asiste edilmiştir. Sayısal olarak yapılan bu analizlerin sonucunda güneş enerjili hava ısıtıcısının ısı pompası verimini %13,28 arttırdığı elde edilmiştir [7]. Bunun yanı sıra pek çok emici plaka geliştirilmiş hem deneysel hem de sayısal analizler ile performansları incelenmiştir [8-13].

Bu durumlara ek olarak sistem performansında artış sağlamak için emici plaka yüzeyine çeşitli katkı malzemeleri eklenmiş ve ısı transferi üzerinde artış elde etmek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Tuncer ve ark. (2023), delikli bölmelere sahip ZnO nano ile geliştirilmiş güneş hava ısıtıcısının performansını deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucu nano geliştirilmiş delikli bölmeli güneş enerjili hava ısıtıcısının hava çıkış sıcaklığı diğer sistemlere kıyasla 2 °C daha yüksektir [14]. Khanlari ve ark. (2022), delikli perdelerle sahip nano geliştirilmiş bir dikey güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirmişler, deneysel ve sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda nano parçacıklar sistem performansını %9,25-10,58 arasında arttırdığını belirtmişlerdir [15]. Selimefendigil ve Şirin (2022), bakır oksit ile geliştirilmiş, termal enerji depolama ünitesi entegre edilmiş ve konvansiyonel depolamalı olarak geliştirilmiş 3 farklı modelde güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirilmiş ve analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada maksimum performans bakır oksitle geliştirilmiş termal enerji depolamalı sistemden %12,52-15,44 arasında elde etmişlerdir [16]. Nazarri ve ark. (2022), CuO nano parçacıklarını kullanarak serpantin borulu ve düz plakalı güneş enerjili hava ısıtıcısının performansını arttırmayı amaçlamışlardır. 3 farklı modelin incelendiği bu çalışmada maksimum performans nano geliştirilmiş sistemden elde edildiği ve nano geliştirme ile sistem performansının %35,8 arttığı vurgulanmıştır [17]. Bunun yanı sıra nano parçacıklar güneş enerjili hava ısıtıcılarının performans iyileştirmesi için kullanılan en önemli malzemelerdendir. Nano parçacıkların kullanımı ile büyük ölçüde performans artışı elde edilebilmektedir [18-21].

Ek olarak farklı emici geometrileri de kolektör performansını önemli derecede etkilemektedir. Öztürk ve Çiftçi (2023), güneş enerjili hava ısıtıcılarının performansını arttırmak için esnek alüminyum hava kanalları geliştirmiş ve bu emici plakaları geleneksel düz plakalı modeller ile kıyaslamışlardır. Bunun dışında nano malzemede uyguladıkları bu çalışmada alüminyum hava

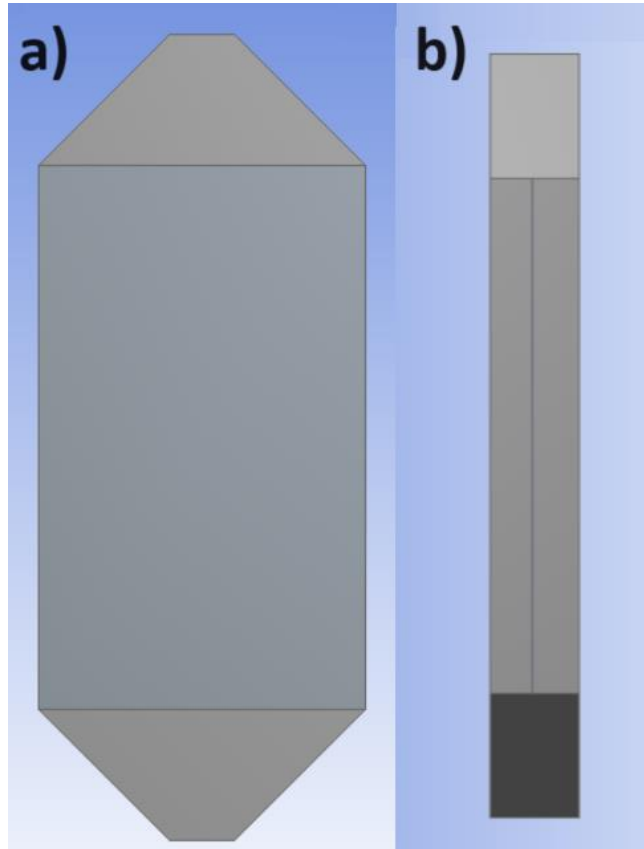
kanallarının güneş enerjili hava ısıtıcılarda kullanılabileceği belirtilmiş ve nano geliştirme ile sistem performansının artırılacağı vurgulanmıştır [22]. Benli (2013), oluklu, trapez, ters oluklu, ters trapez ve taban düz plaka modellerindeki emici yüzeyler içeren güneş enerjili hava ısıtıcılar geliştirmiş ve analiz etmiştir. Elde ettiği sonuçlarda oluklu ve ters oluklu emici plakaya sahip güneş enerjili hava ısıtıcının maksimum performans verdiğini belirtmiştir [23]. Abuşka (2018), konik yüzeyli bir güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirmiş ve farklı hava akış hızlarında deneysel olarak analiz etmiştir. Geliştirilmiş olan konik emici plakalı sistemin 0,10 kg/s hava akış hızında düz plakalı sisteme kıyasla %10,6 daha yüksek performansa sahip olduğu belirtilmiştir [24].

Bu çalışmada güneş enerjili hava ısıtıcıların performansını geliştirmek amacıyla yeni bir emici plaka modeli geliştirilmiş ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta geleneksel düz plakalı model geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. Daha sonra delikli emici plaka modelleri geliştirilmiştir. Her bir emici plakaya sırasıyla dört,

altı ve sekiz adet delik uygulanmıştır. Yapılan sayısal analizler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımı ile gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Geliştirilen kolektör geometrisi ve incelenen parametreler çalışmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır. Artan sayıda delik geometrisinin kullanımı ile yapılan analizler ise çalışmanın bir diğer yenilikçi yönü olarak karşımıza çıkmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada düz plakalı emici yüzeye sahip güneş enerjili hava ısıtıcıların performansını arttırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla emici plakaya farklı işlemler uygulanmış ve yeni oluşturulmuş olan sistemlerin performans analizi ANSYS Fluent yazılımı aracılığı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı aracılığıyla analiz edilmiştir. Şekil 1 geliştirilen güneş enerjili hava ısıtıcısını göstermektedir.



Şekil 1. Güneş enerjili hava ısıtıcı (a) üst, (b) sol yan görünüşü (Solar air heater (a) top, (b) left side view)

Her bir modelin aynı ölçülerde kolektöre sahip olduğu bu sistemde kolektör uzunluğu 740 mm, genişliği 300 mm ve boyu da 75 mm ölçülerine sahiptir. Kolektör içerisine yerleştirilmiş olan emici plakalar ise 500 mm uzunluğunda ve 300 mm

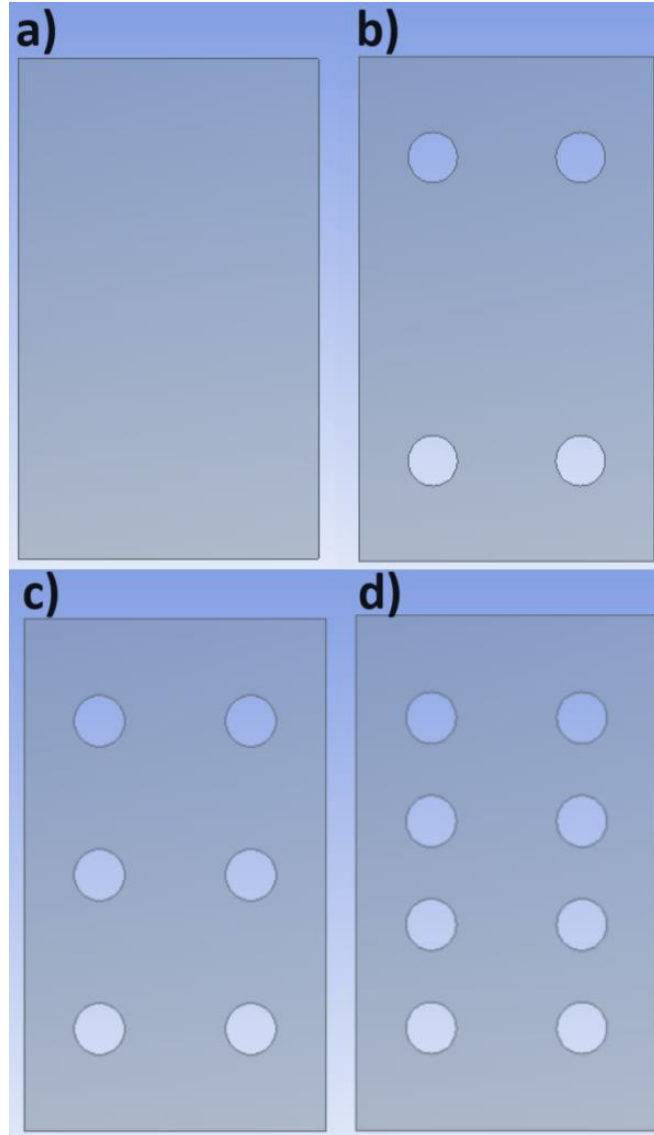
genişliğindedir. Bunun yanı sıra cam örtü de benzer şekilde 500 mm x 300 mm olup 4 mm kalınlığındadır. Hava giriş ve çıkışları 70 mm x 70 mm boyutlarındaki kare hava kanallarından sağlanmaktadır. Başlangıçta standart düz modelde

bir emici plaka içeren sistemin ısıl analizi yapılmıştır. Daha sonra emici plakaya sırasıyla dört, altı ve sekiz adet delikler eklenmiş ve sistem performansı aynı koşullarda incelenmiştir. Eklenmiş olan her bir delik 50 mm çapındadır. Ek olarak dört delikli modelde delikler arasında boyuna mesafe 300 mm enine mesafe de 150 mm olacak şekilde eklenmiştir. Daha sonra dört delikli modelde mesafeler 150 mm x 150 mm iken sekiz delikli modelde bu değer 100 mm x 150 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 2 geliştirilmiş olan farklı modellerdeki emici plakaları göstermektedir.

Geliştirilmiş olan modellerin sayısal analizleri için gerekli olan ağ yapısı uygulamasında standart tetrahedron ağ yapısı kullanılmıştır. Hava giriş-çıkış noktalarının yanı sıra delik bölgelerinde de ekstra küçültme içeren bu modelin toplam eleman sayıları düz plakalı, 4 delikli, 6 delikli ve 8 delikli model

için sırasıyla 9553140, 9699312, 9758416 ve 9758912 olarak elde edilmiştir. Şekil 3 kolektör kasesinin ve emici plakanın ağ yapılarını göstermektedir.

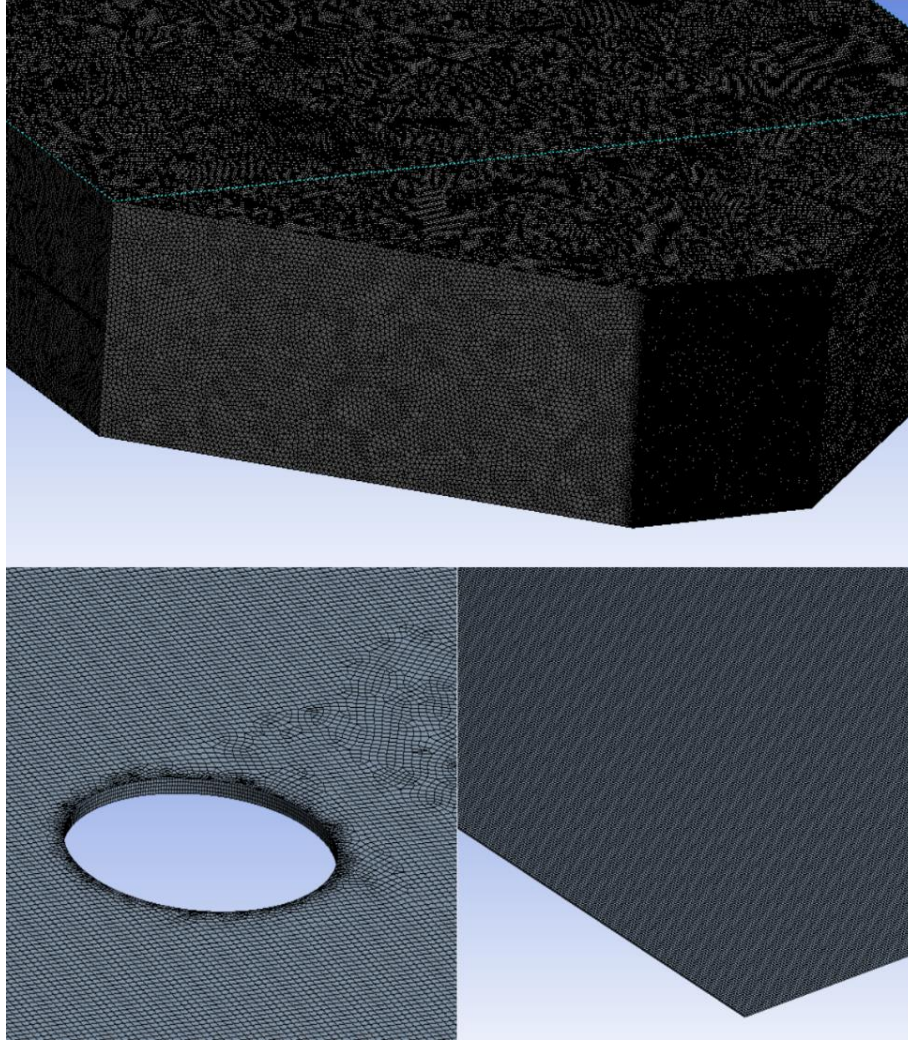
Geliştirilmiş olan her bir güneş enerjili hava ısıtıcı modelinin sayısal analizi için k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. P-1 solar radiations modeli ile kullanılan bu sistemin 1200 W/m^2 güneş ışınımı tercih edilmiş ve 32,8-39,9 enlem-boylam şartları altında sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra kolektör malzemesi için siyah boya ile kaplanmış bakır plaka tercih edilmiş olup kolektör kasesi malzemesi için çelik tercih edilmiştir. Hava giriş şartları ise $3,2 \text{ kg/s}$ ve 17°C olarak tercih edilmiştir (Çizelge 1). Her bir sistem aynı şartlar altında analiz edilmiş olup hava sıcaklığı değişimi, hava akış hızı değişimi ve basınç farkları incelenmiştir.



Şekil 2. (a) Düz plakalı, (b) dört delikli (c) altı delikli, (d) sekiz delikli emici yüzey ((a) Flat plate, (b) four-hole, (c) six-hole, (d) eight-hole absorber surface)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan başlangıç ve sınır şartları (Initial and boundary conditions used in the study)

Başlangıç / Sınır Şartı	Değer
Türbülans modeli	Standard k - ϵ
Işınım modeli	P-1 solar radiations
Enlem-boylam (°)	32,8-39,9
Emici plaka / kolektör malzemesi	Bakır / çelik
Hava debisi (kg/s)	3,2
Hava giriş sıcaklığı (°C)	17

**Şekil 3.** Kolektör kasası ve emici plakanın ağ yapıları (Mesh of the collector case and absorber plate)

3.SAYISAL ANALİZ (NUMERICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada geliştirilmiş olan modellerin sayısal analizleri ANSYS Fluent yazılımından faydalanılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan bu analizlerde k - ϵ türbülans modeli kullanılmış ve kolektör içerisindeki akışkanda hava seçilmiştir.

Geliştirilmiş olan modelin x , y ve z yönündeki hız ve basınç değerlerinin hesaplanması için momentum ve süreklilik denklemlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Sıkıştırılmaz akış altında, yoğunluğun sabit olduğu

göz önüne alınır ve süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilebilir [14]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Süreklilik denklemine bağlı olarak momentum denklemi elde edilir ve x doğrultusundaki momentum denklemi şu şekilde elde edilebilir [14]:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (2)$$

Ek olarak türbülans enerjisini belirtmek için k (taşıma denklemi) kullanılır [14]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i k)}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

Daha sonra türbülans ölçeğinin tanımı için [14]:

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_t} \quad (4)$$

Girdap viskozitesi ise μ_t ile tanımlanır ve şu şekilde ifade edilir [14]:

$$\mu_t = \rho C_\mu L_t \sqrt{k} = \rho C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (5)$$

Enerji denkleminin çözülmesi ile de akışkan alanındaki sıcaklık hesaplanabilir (φ , enerji kaynağı, C_p malzemenin özgül ısı kapasitesi şeklinde belirtilebilir) [14]:

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla \cdot k \nabla T + \varphi \quad (6)$$

Buna ek olarak P-1 radyasyon modeli için radyasyon akısı şu şekilde ifade edilebilir [25]:

$$q_r = - \frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (7)$$

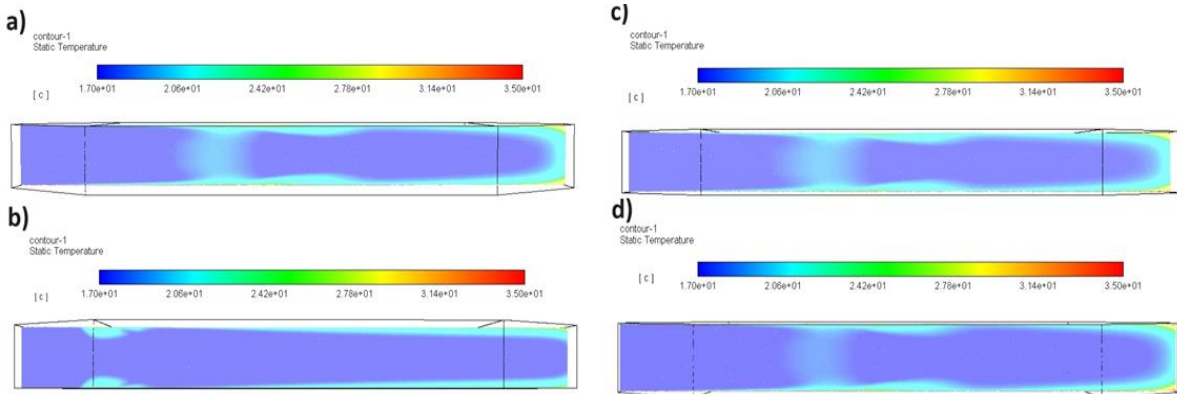
4.SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT & DISCUSSION)

Bu bölümde modellenmiş olan dört farklı şekilde emici plakaya sahip güneş hava ısıtıcıların sayısal analizleri sonucu elde edilen sıcaklık basınç ve hava akış hızı değişimleri paylaşılmıştır.

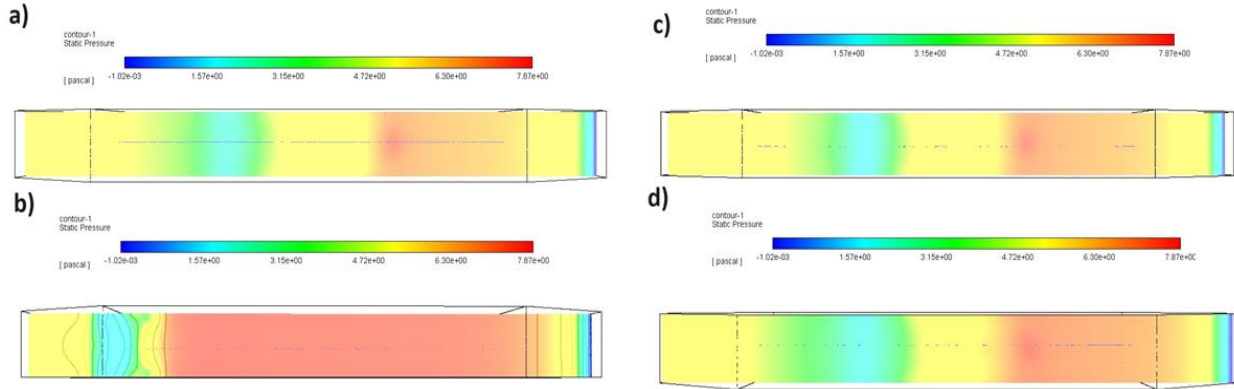
Bir güneş enerjili hava ısıtıcısının performansının en temel parametresi hava giriş ve çıkış noktaları arasındaki sıcaklık farkıdır. Başlıca amacı ortam havasını ısıtmak olan bu sistemlerin giriş ve çıkış noktaları arasındaki sıcaklık farkı ne kadar yüksek

ise sistem performansı da o kadar artış göstermektedir. Bu anlamda geliştirilmiş olan düz plakalı güneş enerjili hava ısıtıcı, 2 delikli güneş enerjili hava ısıtıcı, 4 delikli güneş enerjili hava ısıtıcı ve 8 delikli güneş enerjili hava ısıtıcısının hava çıkış sıcaklıkları yaklaşık olarak sırasıyla 29,60°C, 27°C, 30,5°C ve 33,20°C olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Elde edilen sonuçlardan da görülebileceği gibi 2 delikli sistem dışında delik sayısı ile hava çıkış sıcaklığı doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Oluşturulmuş olan deliklerin akış halindeki havaya türbülans etkisi yarattığı görülmekte ve sistem performansı da aynı ölçüde artış göstermektedir. Sıcaklık dağılım grafikleri incelendiğinde artan delik sayısına paralel olarak sıcaklıkların kolektör uç bölgelerinde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 2 delikli plakada sıcaklık dağılımının diğerlerine kıyasla daha uniform olduğu göze çarpmaktadır. Artan delik sayısı türbülansı arttıracığı için optimum delik sayısında bir plaka ile en iyi sonuçların alınabileceği söylenebilir.

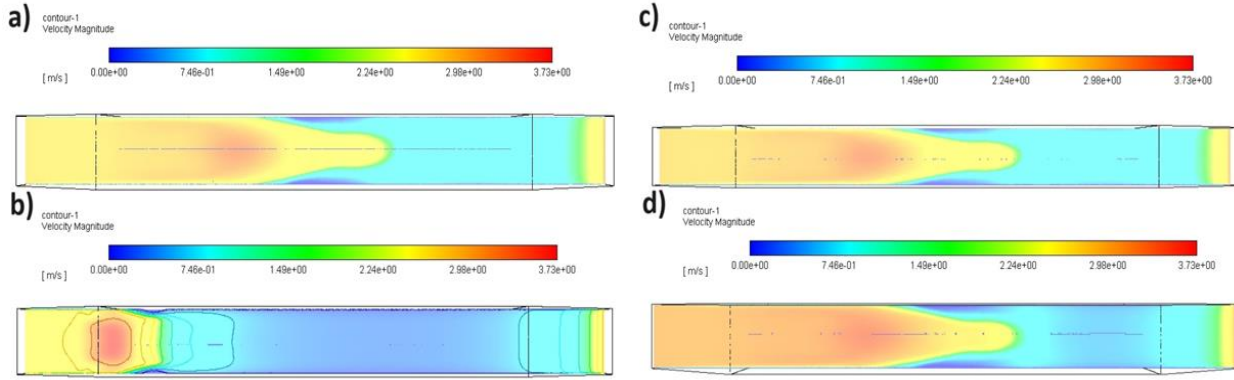
Şekil 5 güneş enerjili hava ısıtıcılara ait yapılan analizler sonucunda elde edilen basınç değişimi, Şekil 6 ise hava akış hızında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Basınç grafikleri incelendiğinde delik sayısına bakılmaksızın uniform bir basınç dağılımı olduğu görülmektedir. Buna karşın, diğer delik sayılarına kıyasla 2 delikli emici plaka kullanıldığında kolektör içindeki hava basıncının daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Benzer şekilde akış hızları grafikleri incelendiğinde akışkan akışının türbülanslı olduğu doğrudan anlaşılmaktadır. 2 delikli emici plaka ile yapılan analiz sonucunda giriş bölgesinden belli bir mesafe sonrasında akış hızında bir düşüş olduğu, diğer bir ifadeyle deliklerin engel gibi davranış sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4. (a) Düz, (b) dört delikli, (c) altı delikli ve (d) sekiz delikli emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcı sıcaklık değişimi (Solar air heater temperature variation with (a) plain, (b) four-hole, (c) six-hole, and (d) eight-hole absorber plate)



Şekil 5. (a) Düz, (b) dört delikli, (c) altı delikli ve (d) sekiz delikli emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcı basınç değişimi (Solar air heater pressure variation with (a) plain, (b) four-hole, (c) six-hole, and (d) eight-hole absorber plate)



Şekil 6. (a) Düz, (b) dört delikli, (c) altı delikli ve (d) sekiz delikli emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcı hava akış hızı değişimi (Solar air heater air mass flow rate variation with (a) plain, (b) four-hole, (c) six-hole, and (d) eight-hole absorber plate)

Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Khanlari ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada delikler içeren engellere sahip güneş hava ısıtıcının kolektör çıkışındaki sıcaklıkların düz plakalı hava ısıtıcılara kıyasla arttığını belirtmişlerdir [15]. Benzer şekilde, Tuncer ve ark. (2023) dikey güneş hava ısıtıcı ile yaptıkları deneysel ve sayısal analizlerle delikli engellerin kolektör çıkışındaki hava sıcaklığını önemli ölçüde arttırdığını raporlamışlardır. Kolektör performansı açısından genel bir değerlendirme yapıldığında, delik geometrisinin yaratacağı basınç düşüşünün eser miktarda olduğunu belirtmişlerdir [14].

5.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada güneş enerjili hava ısıtıcıların performansının artırılması amaçlanmış ve farklı delik sayılarına sahip emici plaka modelleri geliştirilmiştir. Başlangıçta geleneksel düz modeldeki emici plakalı güneş enerjili hava ısıtıcı geliştirilmiş ve sistem performansı analiz edilmiştir. Daha sonra mevcut emici plakaya dört, altı ve sekiz adet delikler eklenmiş ve aynı koşullarda analizler

tamamlanmıştır. Yapılan bu analizler sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve ANSYS Fluent yazılımı aracılığı ile tamamlanmıştır. Ayrıca sistem analizlerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımından faydalanılmıştır. Yapılan bu analizler sonucu elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Maksimum hava çıkış sıcaklığı sekiz delikli modelde elde edilmiş ve en yüksek performansa sergilediği sonucuna varılmıştır.
- Delik sayısı ile hava çıkış sıcaklığı artış göstermiş, oluşturulmuş olan delikler türbülans etkisi yaratmış ve ısı transferini önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- Delik sayısındaki artış ile basınç düşümü meydana gelmiştir. Ayrıca oluşturulmuş olan delikler hava akış hızı üzerinde de önemli etkilere sahiptir. Sekiz delikli modelde hava çıkış noktasında daha yüksek hava akış hızı gözlemlenmiş, böylece sistem performansına artış etkisi sağlamıştır.

- Kolektör giriş ve çıkış noktası arasındaki sıcaklık farkları düz plakalı, dört delikli, altı delikli ve sekiz delikli model için sırasıyla 12,6°C, 10°C, 13,5°C ve 16,2°C olarak elde edilmiştir.
- Meydana gelen basınç düşümleri farklı modeller arasında çok yüksek olmamakta ve önemli ölçüde değişimler ortaya çıkarmamaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Murat ÖZTÜRK: Sayısal analizleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the numerical analysis, analyzed the results and performed the writing process.

Erdem ÇİFTÇİ: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Alic, E., Das, M., & Akpınar, E. K., Design, manufacturing, numerical analysis and environmental effects of single-pass forced convection solar air collector, *Journal of Cleaner Production*, 311 (2021) 127518.
- [2] Ammar, M., Mokni, A., Mhiri, H., & Bournot, P., Numerical analysis of solar air collector provided with rows of rectangular fins., *Energy Reports*, 6 (2020) 3412-3424.
- [3] Embiale, D. T., & Gunjo, D. G., Investigation on solar drying system with double pass solar air heater coupled with paraffin wax based latent heat storage: Experimental and

numerical study., *Results in Engineering*, (2023) 101561.

- [4] Maurya, O. K., Ekka, J. P., Kumar, D., Dewangan, D., & Singh, A., Experimental and numerical methods for the performance analysis of a tubular three-pass solar air heater., *Energy*, 283 (2023) 128640.
- [5] Iqbal, M. H., Ahmed, N., Ali, M., Qaisrani, M. A., Mahmood, M., Waqas, A., ... & Sajid, M. B., Numerical analysis of a novel solar air heater design with V-ribs and jet cooling., *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57 (2023) 103252.
- [6] Raturi, P., Deolal, H., & Kimothi, S., Numerical analysis of the return flow solar air heater (RF-SAH) with assimilation of V-type artificial roughness., *Energy and Built Environment*, 5(2) (2024) 185-193.
- [7] Choi, H. U., & Choi, K. H., Numerical study on the performance of a solar-assisted heat pump coupled with a photovoltaic-thermal air heater., *Energy*, 285 (2023) 129480.
- [8] Alta, D., Bilgili, E., Ertekin, C., & Yaldiz, O., Experimental investigation of three different solar air heaters: Energy and exergy analyses., *Applied Energy*, 87(10) (2010) 2953-2973.
- [9] Khanlari, A., Sözen, A., Şirin, C., Tuncer, A. D., & Gungor, A., Performance enhancement of a greenhouse dryer: Analysis of a cost-effective alternative solar air heater., *Journal of Cleaner Production*, 251 (2020) 119672.
- [10] Widyolar, B., Jiang, L., Brinkley, J., Hota, S. K., Ferry, J., Diaz, G., & Winston, R., Experimental performance of an ultra-low-cost solar photovoltaic-thermal (PVT) collector using aluminum minichannels and nonimaging optics., *Applied energy*, 268 (2020) 114894.
- [11] Mgbemene, C., Jacobs, I., Okoani, A., & Ononiwu, N., Experimental investigation on the performance of aluminium soda can solar air heater., *Renewable Energy*, 195 (2022) 182-193.
- [12] Acır, A., & Çinici, O. K., Experimental investigation of a thermal energy storage unit integrated with thermoelectric generators

- under solar radiation. *Solar Energy*, 265 (2023) 112028.
- [13] Bayyigit, A., Çinici, O. K., & Acır, A., Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin performans analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(2), (2023), 407-420.
- [14] Tuncer, A. D., Amini, A., & Khanlari, A., Developing an infrared-assisted solar drying system using a vertical solar air heater with perforated baffles and nano-enhanced black paint., *Solar Energy*, 263 (2023) 111958.
- [15] Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Aytaç, İ., Çiftçi, E., & Variyenli, H. İ., Energy and exergy analysis of a vertical solar air heater with nano-enhanced absorber coating and perforated baffles., *Renewable Energy*, 187 (2022) 586-602.
- [16] Selimefendigil, F., & Şirin, C., Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic/thermal-air collector modified with nano-enhanced latent heat thermal energy storage unit., *Journal of Energy Storage*, 45 (2022) 103467.
- [17] Nazari, M., Jafarmadar, S., & Khalilarya, S., Exergy and thermoeconomic analyses of serpentine tube flat-plate solar water heaters coated with CuO nanostructures., *Case Studies in Thermal Engineering*, 35 (2022) 102072.
- [18] Selimefendigil, F., Şirin, C., Ghachem, K., Kolsi, L., Alqahtani, T., & Algarni, S., Enhancing the performance of a greenhouse drying system by using triple-flow solar air collector with nano-enhanced absorber coating., *Case Studies in Thermal Engineering*, 34 (2022) 102011.
- [19] Kumar, R., Verma, S. K., & Sharma, V. K., Performance enhancement analysis of triangular solar air heater coated with nanomaterial embedded in black paint., *Materials Today: Proceedings*, 26 (2020) 2528-2532.
- [20] Jeong, D., Lee, J., Hong, H., Choi, D., Cho, J. W., Kim, S. K., & Nam, Y., Absorption mechanism and performance characterization of CuO nanostructured absorbers., *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 169 (2017) 270-279.
- [21] Selimefendigil, F., Şirin, C., & Öztop, H. F., Improving the performance of an active greenhouse dryer by integrating a solar absorber north wall coated with graphene nanoplatelet-embedded black paint., *Solar Energy*, 231 (2022) 140-148.
- [22] Öztürk, M., & Çiftçi, E., Upgrading the performance of a solar air collector with flexible aluminum air ducts and graphene nanoplatelet-enhanced absorber coating., *Thermal Science and Engineering Progress*, 40 (2023) 101760.
- [23] Benli, H., Experimentally derived efficiency and exergy analysis of a new solar air heater having different surface shapes., *Renewable Energy*, 50 (2013) 58-67.
- [24] Abuşka, M., Energy and exergy analysis of solar air heater having new design absorber plate with conical surface., *Applied Thermal Engineering*, 131 (2018) 115-124.
- [25] AFS, P-1 Solar Radiations Modeli Theory, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node112.htm>

AISI 304L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağıyla Birleştirilmesinde Nitrasyon İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

Mehmet ÇOBAN^{1*}  Hakan ADA^{2,3}  Cemil ÇETİNKAYA² 

¹Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/11/2023
Düzeltilme: 20/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Lazer Kaynağı
Nitrasyon
Paslanmaz Çelik
AISI 304L
Östenitik

Article Info

Research article
Received: 09/11/2023
Revision: 20/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Laser Welding
Stainless Steel
AISI 304L
Nitriding
Austenitic

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada AISI 304L paslanmaz çeliğin lazer kaynağıyla birleştirilmesi ve nitrasyon işleminin lazer kaynağına etkileri araştırılmıştır. / In this study, joining AISI 304L stainless steel with laser welding and the effects of nitriding process on laser welding were investigated.



Şekil A: Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numuneler / **Figure A:** Samples assembled by laser welding

Önemli noktalar (Highlights)

- AISI 304L Paslanmaz Çelik / AISI 304L Stainless Steel
- Lazer Kaynağı ile birleştirme / Joining with Laser Welding
- Nitrasyon yüzey sertleştirme işlemi / Nitriding surface hardening process

Amaç (Aim): Otomotiv, uzay, havacılık, sağlık, gıda ve savunma gibi birçok alanda kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağıyla birleştirilmesi ve nitrasyon işleminin lazer kaynağına etkileri konusunda yeterli araştırma yapılmadığı tespit edilmiştir. Yapılan araştırmaların eksikliklerinin giderilmesi ve nitrasyon işleminin kaynak işlemi üzerindeki etkilerinin belirlenmesine katkı olması amacıyla bu çalışma yapılmıştır. / It has been determined that there is not enough research on the laser welding of austenitic stainless steels, which are used in many areas such as automotive, space, aviation, health, food and defense, and the effects of the nitriding process on laser welding. This study was carried out in order to eliminate the deficiencies of the research and to contribute to the determination of the effects of the nitriding process on the welding process.

Özgünlük (Originality): Lazer kesim ve kaynak işlemleri Eskişehir'de bulunan Setuay Lazer firmasında, SEM ve EDS görüntüleme işlemleri Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi'nde, mekanik testler Eskişehir OSB'ye bağlı MEGEM Test Laboratuvarı'nda ve nitrasyon işlemleri Bursa'da bulunan Korkmaz Çelik firmasının'da yapılmıştır. Bütün işlemler takip edilerek prosesler gerçekleştirilmiştir. / Laser cutting and welding processes are done by Setuay Lazer company in Eskişehir, SEM and EDS imaging processes are done by Kastamonu University Faculty of Engineering and Architecture, mechanical tests are done by MEGEM Test Laboratory affiliated with Eskişehir OSB and nitriding processes are done by Korkmaz Çelik company in Bursa. has also been made. All processes were followed and the processes were carried out.

Bulgular (Results): Mekanik testler ile OM, SEM ve EDS incelemelerinde, kaynaklanan tüm numunelerde kaynak işleminin nüfuziyetinin yeterli seviyede olduğu tespitine varılmıştır. / In mechanical tests and OM, SEM and EDS examinations, it was determined that the penetration of the welding process was sufficient in all welded samples.

Sonuç (Conclusion): AISI 304L Östenitik Paslanmaz Çeliklere nitrasyon işleminin lazer kaynağı işlemi öncesinde ve sonrasında uygulanmasının, gerek mekanik testler gerekse makro ve mikro yapı incelemelerinde kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkileyen bir durumun olmadığı sonucuna varılmıştır. / It has been concluded that applying the nitriding process to AISI 304L Austenitic Stainless Steels before and after the laser welding process does not negatively affect weldability in both mechanical tests and macro and micro structure examinations.



AISI 304L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağıyla Birleştirilmesinde Nitrasyon İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

Mehmet ÇOBAN^{1*} Hakan ADA^{2,3} Cemil ÇETİNKAYA²

¹Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/11/2023
Düzeltilme: 20/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Lazer Kaynağı
Nitrasyon
Paslanmaz Çelik
AISI 304L
Östenitik

Öz

Bu çalışmada; paslanmaz çeliklerin lazer kaynağıyla birleştirilmesi ve nitrasyon işleminin lazer kaynağına etkileri araştırılmıştır. Lazer kaynak yöntemiyle, 3 farklı güç parametresinde birleştirilen AISI 304L östenitik paslanmaz çelik numunelere uygulanan mekanik testlerde optimum sonuçların 1500 Watt güç ile birleştirilmiş 2. numunede olduğu görülmüştür. Mikroyapı ve mekanik özellikler açısından optimum sonucu veren 2 numaralı birleştirmeye ait parametreler baz alınarak kaynak öncesi ve sonrasında nitrasyon işlemlerinin uygulandığı 4 ve 5 numaralı deneyler gerçekleştirilmiştir. İncelemeler neticesinde kaynaklanan tüm numunelerde kaynak nüfuziyetinin yeterli olduğu, kaynaklı birleştirmenin penetrasyonunun uygun olduğu, ana malzeme mikroyapılarının eş taneli östenitik paslanmaz çelik mikroyapısına benzediği, kaynak metalinde kaynak merkezine doğru yönelen dendritik ve sütünsal yapıların oluştuğu, ITAB'ın ise lazer kaynağının karakteristik özelliği olarak dar bir bölgede olduğu tespit edilmiştir. Optimum parametrede kaynak ve nitrasyon işlemleri gerçekleştirilen numunelerin mukavemet ve uzama değerleri 2 numaralı deneye yakın değerler gösterse de en yüksek çekme testi sonuçları 2 numaralı deneyde tespit edilmiş, tüm kopmalar ITAB bölgesinde meydana gelmiştir. Eğme testleri sonucunda; kaynaklı birleştirmelerin numunelerin sünekliğine tesir edecek herhangi bir olumsuzluk içermediği, ana malzemeye benzer süneklik sergilediği anlaşılmıştır. Mikrosertlik incelemelerinde; en yüksek mikrosertlik sonuçlarının ITAB bölgelerinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Investigation Of The Effect Of Nitriding Process On Microstructure And Mechanical Properties In Laser Welding Of AISI 304L Stainless Steel Materials

Article Info

Research article
Received: 09/11/2023
Revision: 20/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Laser Welding
Stainless Steel
AISI 304L
Nitriding
Austenitic

Abstract

In this study; Joining stainless steels with laser welding and the effects of nitriding process on laser welding were investigated. In the mechanical tests applied to AISI 304L austenitic stainless steel samples joined with 3 different power parameters by laser welding method, it was seen that the optimum results were in the 2nd sample joined with 1500 Watt power. Experiments 4 and 5, in which nitriding processes were applied before and after welding, were carried out based on the parameters of joint 2, which gave optimum results in terms of microstructure and mechanical properties. As a result of the examinations, it was determined that the weld penetration in all welded samples was sufficient, the penetration of the welded joint was appropriate, the microstructures of the main material resembled the microstructure of co-grained austenitic stainless steel, dendritic and columnar structures directed towards the weld center were formed in the weld metal, and HAZ had a narrow area as a characteristic feature of laser welding. has been found to occur in the region. Although the strength and elongation values of the samples, where welding and nitriding processes were carried out at the optimum parameter, showed values close to experiment number 2, the highest tensile test results were detected in experiment number 2, and all ruptures occurred in the HAZ region. As a result of bending tests; It has been understood that welded joints do not have any negative effects on the ductility of the samples and exhibit ductility similar to the main material. In microhardness examinations; It was concluded that the highest microhardness results were in the HAZ regions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı yüksek dayanım göstermesi sayesinde makine sanayisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak tercih edilmektedir [1, 2]. Bunun yanı sıra kolay şekillendirilebilmesi, iyi kaynaklanabilirliği, yük altında çalışma özelliği, gelişmiş mekanik özellikleri, uzun ömürlü olması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılması paslanmaz çeliği öne çıkaran özelliklerdir. Bu özellikleri barındıran AISI 304L östenitik paslanmaz çelikler, makine sanayiinde sıklıkla tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır [3].

Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak işlemi son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. İstenilen kaynak profilini elde edebilmek için kaynak dikişi önem arz etmektedir. Kaynak dikişinin şekli, kaynak parametreleri ve ısı girdisi ile ilişkilidir. Yüksek kaynak kalitesi ve hatasız kaynak işlemi için kaynak parametrelerinin doğru belirlenebilmesi gerekmektedir [4]. Hatasız kaynak işlemleri, otomasyon sistemlerine uygunluğu ve yüksek kaynak kalitesi gibi üstün özellikleri sayesinde son yıllarda Nd:YAG katı hal lazer kaynağı yaygın olarak tercih edilmektedir [5, 6].

Nitrasyon, malzemelerin yüzey mikroyapılarının değişimi ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan önemli bir termokimyasal yüzey işlemi olarak tanımlanır. Azot difüzyonu malzeme yüzeyinde mikroyapının değişimini sağlayarak sert bir tabaka oluşturur ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağlar [7]. Sertlik oranı yüksek olan nitrür tabakası ile nispeten daha sünek ve yumuşak olan çeliklerin sürtünme ve aşınma direncinde artışlar elde edebilmek mümkündür. Nitrürlemenin düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi sayesinde malzemelerin içyapısı çok fazla değişime uğramadan özelliklerini korurken, oluşması muhtemel süreksizlik ve hatalar da minimize edilebilmektedir. Bu nedenle çeliklerde nitrürleme işlemi, çok önemli bir yüzey sertleştirme işlemi olarak bilinmektedir [8, 9].

AISI 304L paslanmaz çeliklerin lazer kaynağıyla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Torkamany ve arkadaşları, düşük karbonlu ve östenitik paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynaklarının mikroyapı ve mekanik performansına lazer kaynağı modunun etkisini incelediği çalışmada, zayıf tabakadaki füzyon bölgesi büyüklüğünün kontrol edici faktör olduğunu göstermiştir (Torkamany, vd., 2012). Çalgülü ve arkadaşları, CO₂ lazer ışını kullanarak AISI 430

ferritik ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağını inceledikleri çalışmada, en iyi özelliklerin; Helyum atmosferinde, güç girişinin 2500 W ve kaynak hızının 100 cm/dak olduğu durumda elde edildiğini göstermişlerdir (Çalgülü, vd., 2010). Kaya ve Kahraman, 304 östenitik paslanmaz çelik ve 430 ferritik paslanmaz çeliği örtülü elektrod ark kaynağı, TIG ve MIG yöntemleri ile birleştirdikleri çalışmada; çekme testleri sonucu tüm birleştirmelerde kopmaların ferritik paslanmaz çeliğin ana metal tarafındaki kaynak metaline yakın olan ITAB'da gerçekleştiğini, TIG kaynağı ile birleştirilen kaynak bağlantısında en yüksek çekme dayanımı elde edildiğini belirlemiştir (Kaya ve Kahraman, 2011). Köse ve Kaçar 420 martenzitik paslanmaz çeliği CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilerek kaynak bağlantısının mekanik ve metalurjik özelliklerini inceledikleri çalışmada, kaynak öncesinde ön tavlama ve kaynak sonrasında gerilim giderme ısı işlemi uygulanan numunelerde martenzit yapının temperlenmesiyle ITAB ve kaynak metali bölgelerinde mikro çatlak yayılımının önlenmesi sağlanarak arzu edilen ve kabul edilebilir mekanik özellikler elde edildiğini bildirmiştir (Köse ve Kaçar, 2015). Shah ve arkadaşları, lazer kaynağı ile 304 östenitik paslanmaz çeliğinin birleştirilmesi sırasında yayılım bölgesinin taşınımının ısı transferi ve yayılım bölgesi geometrisi üzerinde önemli bir rolü olduğunu ortaya koymuştur (Shah, vd., 2018). Soltani ve Tayebi, TIG ve Nd:YAG lazer kaynağı ile karşılaştırmalı olarak AISI 304L - AISI 316L paslanmaz çelik kaynak bağlantılarını inceledikleri çalışmada, TIG kaynağında kaynak derinliğinin lazer yöntemine göre daha yüksek olduğunu, TIG ve lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin dayanıklılığı ve tokluğunun gerilim arttıkça azaldığını gözlemlemiştir (Soltani ve Tayebi, 2018). Alcock ve Baufeld yaptıkları çalışmada, 304L östenitik paslanmaz çelikte diyot lazer kullanarak 12 kW'lık lazer gücü ve 1,5 m/dk'lık kaynak hızı parametreleriyle kaynak uzunluğu boyunca tam penetrasyon ile başarılı bir şekilde kaynak işlemi gerçekleştirmiştir (Alcock ve Baufeld, 2017). Fuerschbach ve Eisler, yaptıkları çalışmada, Darbeli Nd:YAG lazer nokta kaynakları için kaynak enerjisinin ve süresinin etkisini incelemek için AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunesi üzerinde kalorimetrik ölçümler yapmış ve numune üzerine aynı enerjiye sahip kısa süreli lazer darbeleri uygulandığında, uzun süreli lazer darbelerine göre daha derin kaynak nüfuziyeti sağlandığını tespit etmiştir (Fuerschbach ve Eisler, 2003). Çelen, yaptığı çalışmada 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğin Nd:YAG lazer kaynağı ile dayanım ve

korozyon özelliklerini kaynak parametreleri açısından incelemiş, darbe süresi arttıkça çekme dayanımı değerinin arttığını gözlemlemiştir (Çelen, 2006). Kumar ve Sinha, yaptıkları çalışmada, AISI304L paslanmaz çelik ve St37 çelik plakaları darbeli Nd-YAG lazer kaynağı yöntemi ile birleştirmiş, değişen darbe genişliği parametrelerine göre çekme testleri sonucunda kopma pozisyonunun St 37 karbon çeliği tarafında gerçekleşmesinin kaynaklı bağlantının ana metal olan St 37'ye eşdeğer mukavemette olduğunu ortaya koymuşlardır (Kumar ve Sinha, 2018).

AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağıyla ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde; çalışmaların genelde kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesine odaklandığı görülmektedir. Bu çalışmada literatür çalışmalarında yer almayan ve önemli bir yere sahip AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklere lazer kaynağı öncesi ve sonrası olmak üzere nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Bu sayede nitrasyon işleminin, lazer kaynaklama işlemi öncesi ve sonrasındaki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi için elde edilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada; ticari olarak temin edilen AISI 304L paslanmaz çelik saclara uygulanan lazer kaynağı ve

nitrasyon işleminin kaynaklı birleştirme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Öncelikle lazer kaynağı uygulamalarında optimum parametre belirlenmiş ve optimum parametre üzerinden gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelere kaynak işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere nitrasyon işlemleri uygulanmıştır. Aynı parametrelerde lazer kaynak işlemi gerçekleştirilen AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemeler 3 ayrı kategoride (nitrasyon işlemi olmadan sadece kaynak işlemi uygulanmış numune, önce kaynak daha sonra nitrasyon işlemi uygulanmış numune ve önce nitrasyon işlemi daha sonra kaynak işlemi uygulanmış numune) birleştirilerek, nitrasyon ve lazer kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar aşamasında deneylerde kullanılan malzemelerin yapısal ve mekanik özellikleri hakkında bilgiler verilmiş deneysel çalışmalar esnasında kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler ile test ve incelemeler hakkında detaylı bilgiler sırası ile aşağıda yer almaktadır.

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada kullanılan AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemeler, 150x300x2 mm ölçülerinde kaynak işlemine hazırlanmıştır. AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of AISI 304L stainless steel)

Malzeme	% C	% Cr	% Mn	% Si	% Ni	% Mo	% Nb	% P	% Fe
AISI 304L	0,018	17,9	1,351	0,442	8,34	0,052	0,021	0,028	Kalan

Tablo 2. AISI 304L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri (Mechanical properties of AISI 304L stainless steel)

Akma Muk. (min)(Mpa)	Çekme Muk. (Mpa)	Uzama (min)(%)	Sertlik (HV)
200	485 - 670	40	201

2.2. Metot (Method)

Nitrasyon işlemi ve lazer kaynak işleminin AISI 304L paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bu çalışmada AISI 304L östenitik paslanmaz çelikler Nd:YAG lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemleri Eskişehir'de bulunan Setuay

firmasında (<https://setuay.com.tr>), nitrasyon işlemleri ise Bursa'da bulunan Korkmaz Çelik firmasında (<https://www.korkmazcelik.com>) gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi öncesinde numunelerin kaynaklanacak kenarları, yağ ve kir gibi istenmeyen kirliliklerin kaynak bölgesinden uzaklaştırılması için temizlenmiştir. Kaynak işleminde ilave tel kullanılmamıştır. İşlemi

uygulanmış numunelere optimum. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3'te yer almaktadır. Tablo 3'te verilen deneylerde 1 – 2 ve 3 numaralı deneyler tüm değişkenler sabit tutularak optimum lazer gücünü belirlemek için yapılan ve herhangi bir yüzey işlemi uygulanmadan gerçekleştirilen birleştirmeleri ifade etmektedir. Söz konusu deneyler içerisinde mikroyapı ve mekanik özellikler açısından 2 numaralı birleştirmede kullanılan parametreler optimum parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen 4 numaralı deney; önce kaynak işlemi, daha sonra

nitrasyon işlemi uygulanan birleştirmeyi, 5 numaralı deney ise; önce nitrasyon işlemi, daha sonra lazer kaynak işlemi uygulanan birleştirmeyi ifade etmektedir. Bu sayede aynı parametrelerde kaynak işlemine tabi tutulan herhangi bir işlem görmemiş 2 numaralı deney, önce kaynak işlemi uygulanmış sonra nitrasyon işlemi uygulanmış 4 numaralı deney ile önce nitrasyon işlemi uygulanmış, daha sonra kaynak işlemi uygulanmış 5 numaralı deney birbirleriyle mukayese edilerek nitrasyon işleminin lazer kaynak işlemi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in experiments)

Numune No	Kaynak Öncesi Nitrasyon İşlemi	Kaynak Sonrası Nitrasyon İşlemi	Lazer Gücü (Watt)	İlerleme Hızı Sabit (mm/sn)	Gaz Basıncı Sabit (Bar)
1	Yok	Yok	1300	20	2
2	Yok	Yok	1500		
3	Yok	Yok	1700		
4	Yok	Var	1500		
5	Var	Var	1500		

4 ve 5 numaralı birleştirmelere K_n 2,2 değerinde kontrollü gaz nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Fırın atmosferi olarak amonyak gazı (NH_3) ve karbondioksit gazı (CO_2) birlikte kullanılmış olup, fırın sıcaklığı 300 °C, ortamı ise % 100 NH_3 'tür. Cihazın çevresindeki CO_2 gazı etkisi ile fırın

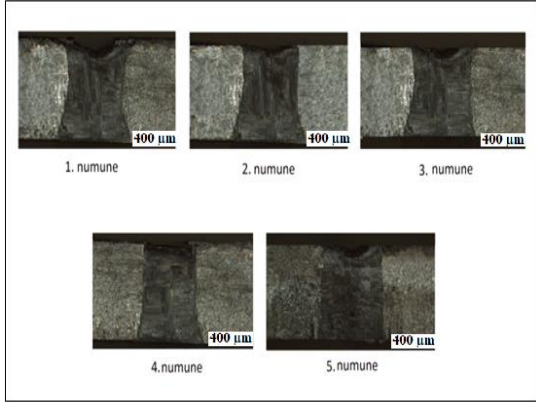
sıcaklığı 580 °C'ye yükselir. Bu aşamada, % 90 NH_3 ve % 10 CO_2 gazı bulunmaktadır. Bu ortam 120 dakika bekledikten sonra %100 azot ortamı soğutma gerçekleştirilmiştir. Nitrasyon işlemine ait parametreler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Nitrasyon işlemine ait parametreler (Parameters of the nitration process)

Nitrasyon işleminde kullanılan gazlar	NH_3 , CO_2
Ön ısıtma	300 °C
Kademeli ısıtma	580 °C'ye kadar
580 °C'de tutma süresi	120 dakika
Soğutma ortamı	Azot

Çalışmada; Tablo 3'te verilen parametrelerle Nd:YAG lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen AISI 304L paslanmaz çelik numunelerin mikroyapısal

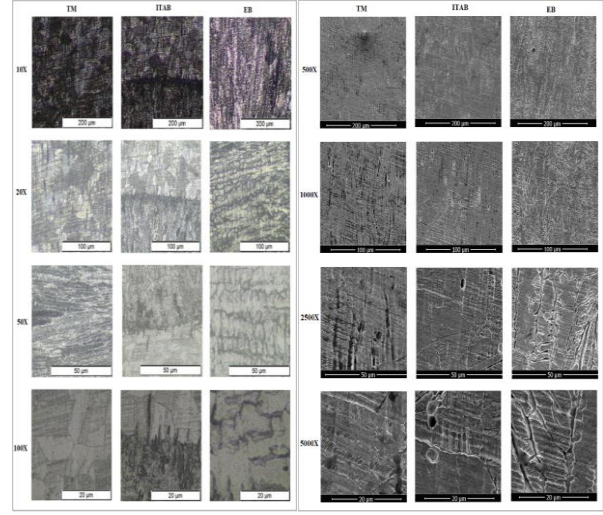
karakterizasyonu optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleriyle, mekanik karakterizasyonu ise çekme, sertlik ve



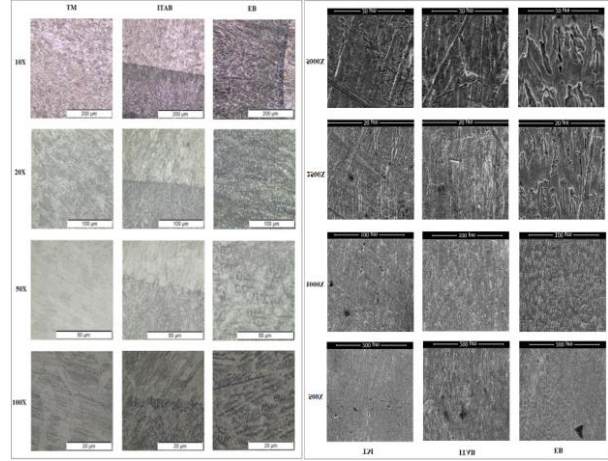
Şekil 3. Numunelerin makro görüntüleri (Macro images of samples)

Şekil 3'te verilen makroyapı görüntülerinin incelenmesi sonucunda tüm numunelerde kaynak nüfuziyetinin iyi olduğu, kaynaklı yüzeyin ve kök yüzeyine ait şeklin geometrik olarak uygun olduğu görülmüştür. Ergime bölgesi ve ana malzeme birbirinden net bir şekilde ayrılırken, parlak tanelerin olduğu ITAB'ın tane yapısının farklılığı ve çok dar bir alanda olduğu göze çarpmaktadır [10]. Bu yöntemde ergime derecesine hızla ulaşılıp, hızlı soğuma neticesinde oda sıcaklığına tekrar hızlı bir iniş olması sayesinde ITAB'ların dar bir alanda olduğu düşünülmektedir [11].

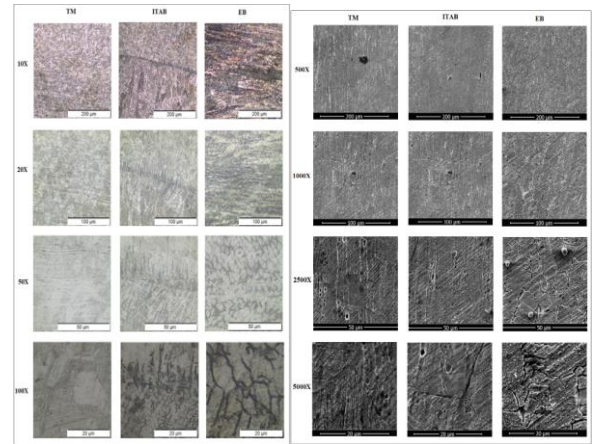
Lazer kaynaklı numunelerin TM, ITAB, EB bölgelerindeki görüntüleri, optik mikroskopta x10, x20, x50 ve x100 büyütme oranlarında, SEM görüntüleri ise, x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütme oranlarında alınmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin optik mikroskop (OM) ve SEM görüntüleri deney sırasıyla Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; ana malzeme mikroyapılarının literatürde tanımlanan eş taneli östenitik paslanmaz çelik mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini genel olarak koruduğu, kaynak metalinde dendritik ve sütümsal yapıda olduğu ve tanelerin kaynak merkezine doğru yönlendiği, lazer kaynağının karakteristik özelliği olarak ana malzemeden kaynak merkezine doğru geçiş bölgesi olan ITAB'ın dar bir bölgede olduğu görülmüştür. ITAB ve kaynak metalinin geçiş bölgesi olarak verilen görüntülerde; ITAB'da ısının etkisiyle ana malzemeye oranla daha iri tanelerin olduğu anlaşılmaktadır [12-14].



Şekil 4. 1 numaralı deneye ait numunenin OM ve SEM görüntüleri (OM and SEM images of the sample from experiment number 1)



Şekil 5. 2 numaralı deneye ait numunenin OM ve SEM görüntüleri (OM and SEM images of the sample from experiment number 2)

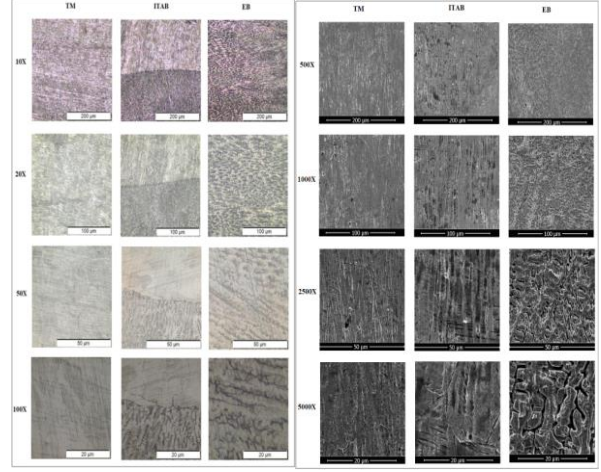


Şekil 6. 3 numaralı deneye ait numunenin OM ve SEM görüntüleri (OM and SEM images of the sample from experiment number 3)

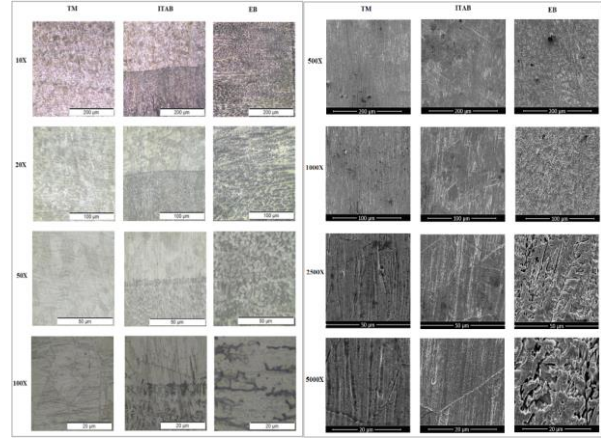
Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’da optimum parametreyi belirlemek için herhangi bir işlem uygulanmadan sadece lazer kaynağının gerçekleştirildiği deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden; düşük güç (1300 W) kullanılarak yapılan 1 numaralı deneyde (Şekil 4) diğer numunelerden daha iri tanelerin oluştuğu anlaşılmıştır. Bu durumun 1300 W gücünün kaynak bölgesinde, 1500 W ve 1700 W gücündeki kaynaklama işlemine nazaran, daha düşük ısı oluşmasından ve soğuma süresinin daha kısa olmasından kaynaklı değişim gösterdiği düşünülmektedir [15]. Şekil 5’te verilen 2 numaralı deneyde, benzer görüntüler elde edilirken, güce bağlı olarak tanelerin incelendiği gözlemlenmiştir. Fotoğraflarda ITAB ve kaynak metali geçiş bölgesi birbirinden net bir şekilde ayrılırken, ITAB’daki yapıların diğer bölgelere göre iri oluştuğu, kaynak metalinde ise dendritik tanelerin varlığı dikkat çekmektedir. Şekil 6’daki görüntüler incelendiğinde; mikroyapısal olarak diğer fotoğraflara benzer görüntüler elde edilmiştir. ITAB ve kaynak metali geçiş bölgeleri net bir şekilde birbirinden ayrılırken, tanelerin diğer numunelere göre daha ince bir yapıda oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun 1700 W uygulanan kaynak gücünün, 1300 W ve 1500 W gücündeki kaynaklama işlemine nazaran kaynak bölgesinde daha yüksek ısı oluşmasından ve soğuma süresinin daha uzun olmasından kaynaklı değişim gösterdiği düşünülmektedir [16].

Şekil 7 ve Şekil 8’de nitrasyon işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 7’de 1500 W’lık optimum lazer gücünde birleştirilen 4 numaralı deneyde, kaynak işleminden sonra uygulanan nitrasyon işlemi sayesinde mikroyapıda oluşan farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu farklılıkların nitrasyon işlemi ile yapıda oluşan tabakalar nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. İşlem öncesinde ve sırasında ilave hiçbir kimyasal element dâhil edilmemiştir.

Nitrasyon işlemi, malzemede ek bir kaplama ya da gevrek faz oluşturmadığı için herhangi bir katman ayrılması riski de yaratmamıştır. Sonuç olarak 4 numaralı numunenin kaynak sonrası mikroyapı incelemelerinde, nitrasyon işleminin kaynaklı birleştirme üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 7. 4 numaralı deneye ait numunenin OM ve SEM görüntüleri (OM and SEM images of the sample from experiment number 4)



Şekil 8. 5 numaralı deneye ait numunenin OM ve SEM görüntüleri (OM and SEM images of the sample from experiment number 5)

Şekil 8’de ise önce nitrasyon daha sonra kaynak işlemi uygulanan ve optimum lazer gücünde birleştirilen 5 numaralı deneyin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden; 5 numaralı numunenin nitrasyon işlemi sonrasında, lazer kaynak işleminin mikroyapısal olarak kaynak üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Numunelere uygulanan çekme testlerinden elde edilen akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve % uzama değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Numunelere ait çekme testi sonuçları (Tensile test results of the samples)

Deney No	Lazer Gücü (Watt)	Akma Dayanımı (MPa) (± 10)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa) (± 10)	% Uzama (± 3)	Kopma Bölgesi
1	1300	320,07	594,97	28,75	ITAB (iri taneli bölge)
2	1500	352,94	653,72	50,62	ITAB (iri taneli bölge)
3	1700	300,15	536,41	20,01	ITAB (iri taneli bölge)
4	1500	344,19	648,13	41,25	ITAB (iri taneli bölge)
5	1500	326,95	612,21	25,62	ITAB (iri taneli bölge)

Tablo 5 incelendiğinde; 2 numaralı numuneye ait değerler tüm numuneler içerisinde en iyi çekme testi sonuçlarını sergilediğinden optimum parametre olarak belirlenmiştir. Kaynak gücünün belirlendiği ilk 3 numunedeki çekme testi sonuçları birbiriyle mukayese edildiğinde en yüksek sonuç 2 numarada gözlemlenirken (1500 W), 1 numarada (1300 W) ortalama dayanım ve uzama değerleri sergilemiştir. Kaynak gücünün en yüksek seçildiği 3 numaralı numunede (1700 W) ise en düşük dayanım ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Optimum parametrede kaynak ve nitrasyon işlemleri gerçekleştirilen 4 ve 5 numaralı numunelerin mukavemet ve uzama değerleri 2 numaraya yakın değerler gösterse de en yüksek sonuçlar (Maksimum Çekme Dayanımı: 653,72 MPa, Akma Dayanımı: 352,94 MPa ve Uzama: % 50,62) 2 numaralı numunede gözlenmiştir. Önce kaynak, sonra nitrasyon işlemi uygulanan 4 numaralı numunede 2 numaralı deneye çok yakın mukavemet ve uzama değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum kaynak işlemi sonrasında uygulanan nitrasyon işleminin dayanım ve uzama değerlerinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Önce nitrasyon, sonrasında kaynak işlemi gerçekleştirilen 5 numaralı numunede ise 2 numaralı deneyden düşük bir mukavemet ve uzama değeri elde edilmiştir. Buradan kaynak işlemi öncesinde uygulanan nitrasyon işleminin, diğer deneylerle (2 ve 4 numaralı deneyler) kıyaslandığında, kaynak işleminden önce yapılan nitrasyon işleminin kaynak nüfuziyetini olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle, mekanik özellikleri de olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılabilir. Ayrıca nitrasyon işlemi ile yüzeye azot uygulaması

yapılmasının kaynak işleminde “azot kırılabilirliği” adı verilen olumsuz bir durumu tetikleyebileceği ve bu durumun da mekanik özellikleri olumsuz etkileyebileceği literatür incelemelerinden bilinmektedir [17]. Sonuç tahmin edilse de; bu çalışmada, tamir bakım kaynak uygulamaları gibi ekstra durumların varlığı nedeniyle yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış malzemeye de kaynak işlemi uygulanmıştır. Bu nedenle, önce nitrasyon, sonra kaynak işlemi uygulanan numunede yaklaşık en düşük mekanik sonuçların oluşması çalışmada beklenen bir durumdur. Çekme testleri sonucunda; nitrasyon işlemi görmüş 4 ve 5 numaralı numunelerin, nitrasyon işlemi görmemiş 2 numaralı numuneye kıyasla akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama değerleri bakımından daha düşük değerlerle sonuçlandığı görülmüştür. Yine nitrasyon işlemi uygulanmış 4 ve 5 numaralı numunelerden, önce nitrasyon işlemi görmüş, sonrasında kaynak işlemi yapılmış 5 numaralı numunenin, önce kaynak işlemi görmüş, sonra nitrasyon yapılmış 4 numaralı numuneye kıyasla çekme testi sonucu oluşan akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama değerleri bakımından daha düşük değerlerle sonuçlandığı görülmüştür. Test sonuçlarından; 4 numaralı numunenin çekme testi sonucu oluşan akma dayanımı maksimum çekme dayanımı ve uzama değerleri 2 numaralı numuneye daha yakın değerlere sahip olduğu ancak 5 numaralı numunenin akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri ile 2 numaralı numunenin değerleri arasında belirgin bir fark olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme testleri sonrasında numunelerin görüntüleri ise Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’da yer alan numunelerin, çekme testi sonucunda yapılan analizlerde kopmaların

ITAB bölgesinden meydana geldiği görülmüştür. Mikroyapı analizleri incelendiğinde kaynak metalinin hemen yanında oluşan iri taneli bölgenin mukavemetinin diğer bölgelere göre daha düşük oluşması beklenen bir durumdur [18]. Bu durumdan dolayı tüm kopmaların kaynak metalinin hemen bitişiğinde iri taneli bölgelerde oluşmuştur. Bu durum tüm numunelerde kaynak dikişinin mukavemetli olduğunu göstermektedir.



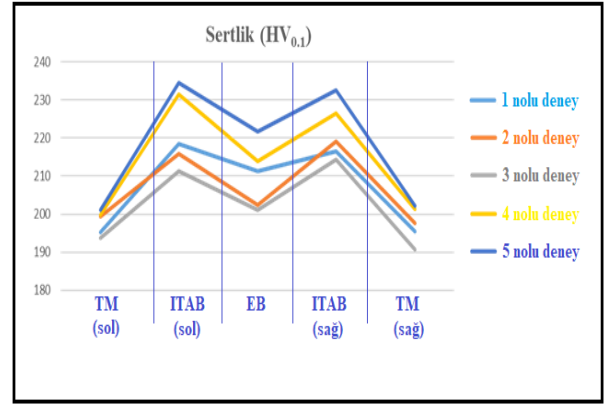
Şekil 9. Çekme testi sonrası numuneler (Samples after tensile test)

Nitrasyon işlemi görmemiş farklı güç parametrelerinde kaynak işlemi yapılan 1,2 ve 3 numaralı numuneler ile nitrasyon işlemi görmüş ve optimum parametrede (2 numaralı deney) birleştirilmiş 4 ve 5 numaralı numuneler için kaynak tarafı ve kök tarafı olmak üzere 2'şer adet eğme testi yapılmıştır. Eğme testi sonrası numunelerin görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Eğme testi sonrası numuneler (Samples after bending test)

Şekil 10'da eğme testi sonrası görüntüleri verilen numunelerin kep ve kök tarafı gözle muayene incelemesi yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde; kaynak bölgesinde çatlama, yırtılma, kırılma, kopma vb. olumsuzluk teşkil eden herhangi bir durumun bulunmadığı sonucuna varılmıştır. Buradan kaynak bölgesinin, numunenin sünekliğine tesir edecek herhangi bir olumsuzluk içermediği, kaynak bölgesinin ana malzemeye benzer bir süneklik özelliği sergilediği anlaşılmıştır [19]. Nitrasyon işlemi görmemiş farklı güç parametrelerinde kaynak işlemi yapılan 1,2 ve 3 numaralı numuneler ile nitrasyon işlemi görmüş ve optimum parametrelerde birleştirilmiş 4 ve 5 numaralı numuneler için, TM, ITAB, EB bölgelerinden alınmış 5'er adet mikrosertlik ölçümlerinin ortalaması Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Sertlik testi sonuçlarına ait grafik (Graph of hardness test results)

Şekil 11'deki grafik incelendiğinde; grafikteki en belirgin özelliğin merkezden itibaren her iki yöne simetrik olmasıdır. Burada kaynak esnasında kullanılan kaynak gücü hariç sabit parametrelerin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, kaynak esnasında doğru fikstürleme ve otomatik kaynağın yanı sıra ilave metal kullanılmaması gibi etkenler grafiklerin benzer ve hatalardan uzak olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grafikler incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin ergime sınırına bitişik ITAB'ın iri taneli bölgesinden 234,5 HV (5 numaralı numune) olarak ölçülmüştür. Kaynak metali sertliklerinin ise bu bölge sertliklerine nispeten yakın değerlerde olduğu görülmektedir (1. numune 211,2 HV, 2. Numune 202,5 HV, 3. Numune 201,2 HV, 4. numune 213,8 HV ve 5. numune 221,7 HV ölçülmüştür). Yine sertlik sonuçları ve grafiklerden nitrasyon işlemi yapılarak birleştirilen 4 numaralı deney (231,4 HV) ve 5 numaralı deney (234,5 HV) deneylerin kaynak metali ve ITAB'daki sertlik değerlerinin, nitrasyon işlemine tabi tutulmadan birleştirilen 1 numaralı

deney (218,5 HV), 2 numaralı deney (219,2 HV) ve 3 numaralı deneyden (214,3 HV) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin genelinde, kaynak bölgesi ve ITAB'daki sertlik değerleri ana metalin sertlik değerlerinden fazla çıkmış olup, ITAB'daki sertlik değerleri kaynak metalinden bir miktar daha yüksek tespit edilmiştir [20]

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklere lazer kaynağı ile birlikte nitrasyon işleminin uygulandığı bu çalışmada ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Makroyapı görüntüleri incelendiğinde tüm numunelerde kaynak nüfuziyetinin yeterli şekilde olduğu, kaynaklı birleştirmenin penetrasyonunun uygun olduğu anlaşılmaktadır.
- Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; ana malzeme mikroyapılarının literatürde tanımlanan eş taneli östenitik paslanmaz çelik mikroyapısına benzediği, kaynak metalinde dendritik ve sütünsal yapının olduğu ve tanelerin kaynak merkezine doğru yönlendiği, ITAB'ın ise; lazer kaynağının karakteristik özelliği olarak dar bir bölgede olduğu görülmüştür.
- 2 numaralı numuneye ait değerler tüm numuneler içerisinde en iyi çekme testi sonuçlarını sergilediğinden optimum parametre olarak belirlenmiştir. Kaynak gücünün belirlendiği ilk 3 numunedeki çekme testi sonuçları birbiriyle mukayese edildiğinde en yüksek sonuç 2 numarada gözlemlenirken (1500 W), 1 numarada (1300 W) ortalama dayanım ve uzama değerleri sergilemiştir. Kaynak gücünün en yüksek seçildiği 3 numaralı numunede (1700 W) ise en düşük dayanım ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Optimum parametrede kaynak ve nitrasyon işlemleri gerçekleştirilen 4 ve 5 numaralı numunelerin mukavemet ve uzama değerleri 2 numaraya yakın değerler gösterse de en yüksek sonuçlar (Maksimum Çekme Dayanımı: 653,72 MPa, Akma Dayanımı: 352,94 MPa ve Uzama: % 50,62) 2 numaralı numunede gözlenmiştir. Önce kaynak, sonra nitrasyon işlemi uygulanan 4 numaralı numunede 2 numaralı deneye çok yakın mukavemet ve uzama değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum kaynak işlemi sonrasında uygulanan nitrasyon işleminin dayanım ve uzama değerlerinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır.
- Çekme testleri sonucunda, tüm kopmaların ITAB bölgesinde meydana geldiği görülmüştür.
- Kep ve kök tarafına gerçekleştirilen eğme testleri sonucunda numunelerde kaynak bölgesinde çatlama, yırtılma, kırılma, kopma vb. olumsuzluk

teşkil eden herhangi bir durumun bulunmadığı, kaynak bölgelerinin numunelerin sünekliğine tesir edecek herhangi bir olumsuzluk içermediği, ana malzemeye benzer süneklik özelliği sergilediği anlaşılmıştır.

- En yüksek sertlik değerlerinin ergime sınırına bitişik ITAB'ın iri taneli bölgesinden 234,5 HV (5 numaralı numune) olarak ölçülmüştür.
- Kaynak metali sertliklerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür (1. numune 211,2 HV, 2. Numune 202,5 HV, 3. Numune 201,2 HV, 4. numune 213,8 HV ve 5. numune 221,7 HV ölçülmüştür).
- Nitrasyon işlemi yapılarak birleştirilen 4 numaralı deney (231,4 HV) ve 5 numaralı deneyin (234,5 HV) kaynak metali ve ITAB'daki sertlik değerlerinin, nitrasyon işlemine tabi tutulmadan birleştirilen 1 numaralı deney (218,5 HV), 2 numaralı deney (219,2 HV) ve 3 numaralı deneyden (214,3 HV) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu makalenin hazırlanmasında detek sağlayan Setuay Eskişehir Lazer firmasına, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi'ne, OSB'ye bağlı MEGEM Test Laboratuvarına ve Korkmaz Çelik firmasına teşekkür ederim.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

He conducted the experiments, analyzed the results and wrote the model.

Hakan ADA: Deneyleri yapılma süreçlerini kontrol etmiş, deney sonuçlarının analiz işlemini gerçekleştirmiştir.

He controlled the process of conducting the experiments and performed the analysis of the experimental results.

Cemil ÇETİNKAYA: Deneyleri yapılma süreçlerini kontrol etmiş, deney sonuçlarının analiz işlemini gerçekleştirmiştir.

He controlled the process of conducting the experiments and performed the analysis of the experimental 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] Aran, A. & Temel. (2004) M.A. Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Acar Matbaacılık, İstanbul, s. 10-29.
- [2] Ekinci, C. (2011). Düşük Karbonlu Mikro Alaşımli Çeliklerin Sertlik Ve Mikroyapıları Üzerine Soğuma
- [3] Akhtar, S. S. Arif, A. F. M. & Yilbas, B. S., (2010). Evaluation of gas nitriding process with in-process variation of nitriding potential for AISI H13 tool steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 47, 687–698.
- [4] Blackburn. (J. 2012). “Laser welding of metals for aerospace and other applications”, *Welding and Joining of Aerospace Materials*, 75-108, Philadelphia, USA.
- [5] Baruah, M. & Bag, S. (2017). Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*, 90(8), 40-51.
- [6] Yılmaz, R. (2017). “Östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özellikleri”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3):598-605.
- [7] Çalgülü, U., Dikbaş, H. & Taşkın, M. (2010). The effects of high weldings speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar components (AISI 430 – AISI 304) welded by CO2 laser beam welding. *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 5(2), 160- 177. 79.
- [8] Çelen, S. (2006). Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [9] Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A. D. & Tunuslu, O. (2017). Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri ile Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1), 64–71.
- [10] Bilen, F. A. (2006). “Hardox 400-AISI 304 çelik çiftlerinin plazma transferli ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*.
- [11] Tokdemir, M., Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. & Meriç, C. (2010). Lazer kaynağı ve uygulamaları. *Makinatek*, 152: 122-128 s.
- [12] Özcan, M. (2003). Değişik malzemelerin işlenmesinde kullanılan Nd:YAG lazerleri için etkin bir güç kaynağının tasarımı ve uygulaması. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- [13] Uzun, R. O. (2010). Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [14] Yavuz, H. & Çam, G. (2005). Lazer-ark hibrit kaynak yöntemi. *Mühendis ve Makina*, 46 (543): 14-19 s.
- [15] Kaya Y. & Kahraman N. (2011). Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(4), 263-270.
- [16] Uzun, R.O, Keleş Ö, (2012). Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 27, No 3, 509-517*.
- [17] Deveçeker, Y. & Çevik, E. (2022). 23MnB4 Kalite Çeliklerde Vakum da Gaz Giderme İşleminin Nihai Ürün Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi . *Çelik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* , 3 (1) , 6-11 .Retrievedfrom<https://dergipark.org.tr/en/pub/jesre/d/issue/72095/1124553>
- [18] Kılınçer S, Kahraman N, AISI 409 ve Ç1010 Çeliğin Östenitik Elektrot Kullanarak MIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der, Cilt 24, No 1, 23-31, 2009*.
- [19] Köse C. & Kaçar, R. (2015). AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin CO2 lazer ışını kaynak yöntemiyle kaynak kabiliyetinin araştırılması. *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 7223(6), 13-27.

[20] Püskülcü, G. & Koçlular, F. (2009). Lazer kaynak yöntemi ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 50 (599): 8-17 s.

Yakın Yüzeyle Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Semih Sadi KILIÇ^{1,2} , Halil İbrahim VARIYENLİ^{3*} 

¹Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü, Ankara Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 28/11/2023

Revision: 12/12/2023

Accepted: 21/12/2023

Keywords

Yakın yüzeyle bertaraf tesisi
Radyoaktif atık
Çok düşük seviyeli atık
Kısa yarı ömürlü düşük
ve orta seviyeli atık
Tesis maliyetlendirme
Ölçeklendirme

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 28/11/2023

Düzeltilme: 12/12/2023

Kabul: 21/12/2023

Anahtar Kelimeler

Near-surface disposal
facility Radioactive waste
Very low-level waste
Short-lived low and
intermediate-level waste
Facility costing
Scaling

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Çalışmada, yakın yüzeyle bertaraf tesislerinin maliyetlendirilmesine dair formülizasyon, ekonomik analiz yöntemleri, maaş faktörü, ölçeklendirme, belirsizlik ilkeleri ve teknik yaklaşımlarla dünyadaki tesisler örneğinde oluşturulmuş ve Türkiye için senaryolar ortaya koyulmuştur. / In the study, the formulation for the cost estimation of near-surface disposal facilities was developed based on the examples of facilities on the world, using economic analysis methods, salary factor, scaling, contingency principles and technical approaches. Scenarios were also developed for Türkiye.

	2 Nükleer Güç Santrali (10 GWe)			3 Nükleer Güç Santrali (15 GWe)		
	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS
Toplam Hacim (⁰⁰⁰ m ³)	Hendek: 84 Tonoz: 104	Hendek: 111 Tonoz: 131	Hendek: 138 Tonoz: 158	Hendek: 124 Tonoz: 154	Hendek: 164 Tonoz: 194	Hendek: 205 Tonoz: 235
Lisans/ Plan	74	80	85	84	90	96
İnşaat	351	413	471	457	539	616
İşletme	767	1074	1269	1215	1499	1774
Kapatma	276	312	344	334	378	417
Toplam	1468	1879	2169	2089	2506	2903

Şekil A: Yakın Yüzeyle Bertaraf Tesisi Gecelik Maliyeti İçin Senaryo Analizi (M\$) / Figure A: Scenario Analysis for Near-Surface Disposal Facility Overnight Cost

Önemli noktalar (Highlights)

- Radyoaktif atık yönetiminde ülkeler için maliyetler oldukça önemlidir. / Radioactive waste management costs are very important for countries.
- Yakın yüzeyle bertaraf tesislerinin radyoaktif atık yönetiminde oldukça önemli bir yeri vardır. / Near-surface disposal facilities play a significant role in radioactive waste management.
- Toplam radyoaktif atık hacmi, atığın türü, maaş faktörü, ölçeklendirme, belirsizlik ilkeleri ve teknik yaklaşımlar maliyetleri etkileyen başlıca hususlardır. / The total volume of radioactive waste, the type of waste, the salary factor, scaling, contingency principles, and technical approaches are the main factors affecting costs

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, radyoaktif atık yönetiminin önemli tesislerinden birisi olan yakın yüzeyle bertaraf tesisinin maliyetinin yaklaşık değerini gösteren katsayılar ve ölçeklendirmeyi bulabilmektir. / The purpose of the study is to find the coefficients and scaling that show the approximate value of the cost of the near-surface disposal facility, which is one of the important facilities in radioactive waste management.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, tek bir tesis özelinde olmayan ve yakın yüzeyle bertaraf tesislerini bütün dünyada istenilen kapasitede inşa edilmek için kullanılacak ve Türkiye için senaryo analizi sunan ilk çalışmadır. / This study is the first study that is not specific to a special facility and can be used to build near-surface disposal facilities of any desired capacity in the world and provides a scenario analysis for Türkiye.

Bulgular (Results): Çalışma, senaryo analizleri ışığında ülkemiz için yakın yüzeyle bertaraf tesisine dair oluşabilecek maliyetleri ortaya koymaktadır. / The study reveals the potential costs of a near-surface disposal facility for our country in the light of scenario analyses.

Sonuç (Conclusion): Ölçeklendirme faktörü lisans ve planlama için 0,3, inşaat için 0,68, işletme ve uzun süreli izleme için 0,85 ve kapatma için ise 0,49 olarak bulunmuştur. Maliyetlerin ülkemizde planlanan 15 GWe kurulu güç için 3 milyar dolara ulaşabileceği sonucu elde edilmiştir. / The scaling factor was found to be 0.3 for licensing and planning, 0.68 for construction, 0.85 for operation and long-term monitoring, and 0.49 for closure. it was found that these costs could reach 3 billion dollars for the 15 GWe installed capacity planned in our country.



Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Semih Sadi KILIÇ^{1,2} , Halil İbrahim VARIYENLİ^{3*} 

¹Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü, Ankara Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 12/12/2023
Accepted: 21/12/2023

Keywords

Yakın yüzey bertaraf tesisi
Radyoaktif atık
Çok düşük seviyeli atık
Kısa yarı ömürlü düşük
ve orta seviyeli atık
Tesis maliyetlendirme
Ölçeklendirme

Öz

Radyoaktif atık yönetimi nükleer alanda teknoloji sahibi ülkeleri yakından ilgilendirmektedir. Özellikle nükleer güç santraline sahip olan ülkeler depolamanın da ötesinde bertaraf ihtiyacı duymaktadır. Çok düşük seviyeli ve kısa ömürlü düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar, radyoaktif atık yönetiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, çok düşük seviyeli ve kısa ömürlü düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar için bertaraf tesisi maliyetlerinin bulunabilmesi ve Türkiye için uygun senaryo analizlerinin oluşturulması hedeflenmiştir. Maliyetlerin tespiti öncesinde ilk olarak bertaraf tesislerinin türleri, örnekleri ve teknik özellikleri incelenerek tesise dair teknik yaklaşım geliştirilmiştir. Sonrasında tesis kapasitesi, yıllık radyoaktif atık miktarı ve işletme süresinin belirlenebilmesi adına nükleer güç santralleri için işletme ve işletmeden çıkarma döneminde, diğer tesis ve uygulamalarda faaliyetlerin gerçekleştirildiği dönemlerde ortaya çıkan radyoaktif atık miktarları hacimsel bazda ayrı ayrı belirlenmiştir. Nihayetinde ekonomik analiz yöntemleri, maaş faktörü, ölçeklendirme ve belirsizlik yaklaşımları kullanılarak hendek ve tonoz yapılar için ayrı ayrı olmak üzere maliyet formülleri oluşturulmuştur. Bu formüller yakın yüzey bertaraf tesislerinde yüksek seviye maliyet tahmini yapacak ülkeler için ön çalışma veya çalışmaları doğrulayıcı olarak kullanılabilir. Ülkemizde 8 veya 12 büyük ölçekli nükleer reaktörün kurulması yani yaklaşık kurulu gücün 10 GWe ve 15 GWe olması durumları için senaryo analizleri yapılarak önerilerde bulunulmuş ve genel değerlendirme yapılmıştır.

Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 12/12/2023
Kabul: 21/12/2023

Anahtar Kelimeler

Near-surface disposal
facility Radioactive waste
Very low-level waste
Short-lived low and
intermediate-level waste
Facility costing
Scaling

Abstract

The management of radioactive waste is of significant concern to countries with nuclear capabilities. Particularly, countries with nuclear power plants need more than just storage; they require proper disposal methods. Low-level and short-lived low and intermediate-level radioactive wastes constitute a substantial portion of radioactive waste management. This study aims to determine the costs of disposal facilities for very low-level, short-lived low, and intermediate-level radioactive wastes and to create suitable scenario analyses for Türkiye. Prior to cost determination, an initial technical approach for the facility was developed by examining the types, examples and technical specifications of disposal facilities. Subsequently, the capacities of the facilities, annual amounts of radioactive waste, and operational periods were determined separately for nuclear power plants during operation and decommissioning periods, as well as for other facilities and practices involving radioactive waste. Ultimately, cost formulas were developed separately for trench and vault structures using economic analysis methods, salary factor, scaling, and contingency approaches. These formulas can be used as a preliminary study or validation for countries that will make high-level cost estimates in near-surface disposal facilities. Scenario analyses were conducted for the installation of 8 or 12 large-scale nuclear reactors in the country, corresponding to approximately 10 GWe and 15 GWe of installed capacity, respectively. Recommendations were made based on these scenarios, and a comprehensive assessment was conducted.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Radyoaktif atıklar, radyoaktivite ve radyoaktivitenin ürettiği ısı seviyelerine, içerdikleri radyonüklitlerin yarı ömürlerine göre sınıflandırılmaktadır. Radyoaktif atıkların sınıflandırılmasında ülkelerin farklı yaklaşımları olabilmektedir. Birçok ülke tarafından bu konuda Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) güvenlik standartları ile belirlenen sınıflandırma esas alınmaktadır. Ulusal radyoaktif atık sınıflandırması ile UAEA radyoaktif atık sınıflandırması arasında bir paralellik bulunmakla birlikte, ulusal sınıflandırmada Düşük Seviyeli ve Orta Seviyeli (DOS) radyoaktif atıkların tek sınıf olarak ele alınması yönüyle bir farklılık bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında bilinmesi gereken Çok Düşük Seviyeli (ÇDS) radyoaktif atık, muafiyet sınırının üzerinde radyoaktivite içeren, çok kısa ömürlü radyoaktif atık sınıfına girmeyen ve serbestleştirme sınırlarının da yaklaşık 100 katının altında aktivite konsantrasyonu içeren radyoaktif atıklar olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte DOS radyoaktif atık ise, radyoaktivite seviyeleri ÇDS radyoaktif atıkların aktivite konsantrasyonundan fazla olan ancak yüksek seviyeli radyoaktif atık sınıfına girmeyen atıklar olarak tanımlanmaktadır. Atığın insanlar ve çevre için radyolojik bir tehdit oluşturup oluşturmayacağı atıktaki radyonüklitlerin yarılanma ömrüne de bağlıdır. Radyonüklitler 30 yıl veya daha az yarı ömürlü ise kısa ömürlü olarak belirlenir. Radyonüklitler daha uzun yarılanma ömürleri ile özellikle yüksek seviyeli radyoaktif atıklarda olmak üzere orta seviyeli radyoaktif atıklarda da bir dereceye kadar bulunurlar [1,2].

Radyoaktif atıkların büyük çoğunluğu Nükleer Güç Santrali (NGS) enerji üretimi sonucunda ortaya çıksa da araştırma, tıp ve endüstri alanlarında da yapılan uygulamalarda da radyoaktif atıklar meydana gelmektedir. Bu radyoaktif atıkların doğadan izole edilmesi ve güvenli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Radyoaktif atık yönetiminin türü ve bunların somut gereklilikleri farklı radyoaktif atıkların risk potansiyellerine göre belirlenir [3].

Radyoaktif atığın geri alınma niyeti olmadan uygun bir tesise yerleştirilmesi işlemine bertaraf denilmektedir. Genelde uygun konteynerlere yerleştirilmiş katı formdaki radyoaktif atıklara uygulanır. Bunlar radyoaktif maddelerin çevreye göç etme riskini en aza indirmek amacıyla ilk önce uygunlaştırma işlemiyle güvenli taşıma, depolama ve bertaraf için kararlı bir forma dönüştürülür [2].

Atıkların özelliklerine ve güvenlik gerekliliklerine göre farklı radyoaktif atık yönetimi teknikleri kullanılır. ÇDS radyoaktif atıklar genellikle yüzeyde,

kısa yarı ömürlü DOS radyoaktif atıklar ise genellikle yakın yüzeyde veya orta derinlikte nihai bertaraf edilir. İzleme ve bakım, nihai tesis kapatılana kadar sürekli devam eder. Normalde, radyoaktif atıkların bertarafı için üç farklı derinlik seviyesi uygun kabul edilir. 30 metreye kadar olan tesisler Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (YYBT) olarak kabul edilir. Orta derinlikteki tesisler yüzeyin yaklaşık 30 ila 100 m altındaki menzildedirler. Derin jeolojik tesisler ise genellikle yaklaşık 500 m'den daha büyük derinliklerde kabul edilir. Artan aktivite seviyeleri ve daha uzun yarı ömürler, daha fazla önlem alınmasını gerektirir. Bununla birlikte, derinlik radyoaktif atık bertarafında önemli hususlardan yalnızca bir tanesidir. Kaya oluşumu ve özellikleri, tesisin mühendislik özellikleri, düzenleyici kısıtlamalar, ulusal politika vb. eşit veya daha çok öneme sahip diğer faktörlerdir. ÇDS radyoaktif atıklar ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atıkların bertarafı için kullanılan YYBT'nin maliyetlendirilmesi bu çalışma kapsamındadır [3,4].

Literatürde, YYBT'lerin maliyetlendirilmesi, ülkeler için maliyet planlarının yapılması ve ölçeklendirmelerine dair sınırlı sayıda kaynak yer almaktadır. Uluslararası kuruluş olan UAEA, bu çalışmanın teknik gereksinimleri üzerine 2002, 2003, 2004, 2013, 2017, 2020 yıllarında raporlar ve teknik dokümanlar hazırlamıştır [2,5,6,7,8,9]. Bunun yanı sıra yine uluslararası bir kuruluş olan OECD/NEA 2013'de nükleer yakıt çevrimi tesislerinin ekonomisi başlıklı raporunu ülkelerin deneyimlediği maliyetleri de içerecek şekilde yayınlamıştır [10].

Avrupa komisyonu, 2020 yılında radyoaktif atık ve kullanılmış yakıtla ilgili avrupa ülkelerinde oluşan tesis maliyetlerine yer verecek şekilde bir rapor hazırlamıştır [11]. Bu rapor, gelecek nesillere aşırı yük getirmeden kullanılmış yakıt ve radyoaktif atıkların sorumlu ve güvenli yönetimi için hazırlanmış Avrupa Birliği Konseyi Direktifi 2011/70/Euratom çerçevesinde hazırlanmıştır. Bunun dışında EURAD kısaltması ile anılan 2019-2024 yılları için planlanan projenin de raporu 2022 yılında yayınlanmıştır [12].

Micheal I. Ojovan ve Hans J. Steinmetz tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada nükleer atıklara ilişkin bertaraf yaklaşımları üzerinde durulmuştur [13]. 2020 yılında, Fan Xia, Jiyun Zhao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, Çin'deki DOS radyoaktif atık bertaraf stratejisini etkilemek için aktivite temelli yaşam döngüsü maliyet hesaplama (AB-LCC) yaklaşımına dayalı bir temel maliyet tahmin modeli önerilmiştir. AB-LCC modeli, DOS radyoaktif atık bertarafının dinamik maliyet tahminini sağladığı belirtilerek uygulamanın bölge ve zaman tarafından kısıtlanmadığı ifade edilmiştir [14].

2011 yılında Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından 18 ülkede Düşük Seviyeli (DÜS) radyoaktif atıkların bertarafının nasıl yapıldığına dair

teknik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Her bir ülke için nükleer kapasite, düzenleme ve yasalar, radyoaktif atık yönetimi uygulamaları ve tesisleri, şuan ki ve gelecekte radyoaktif atıklara dair durum incelenmiştir [15]. Yine Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından 1997 yılında kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık envanterine dair çalışma yapılmıştır [16]. 2013 yılında, Haiying Chen, Chunming Zhang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ÇDS radyoaktif atık ve bertarafı hakkındaki yerel ve yabancı tanımlar belirtilerek ÇDS radyoaktif atıkların yüzeye yakın bertaraf alanları için yerleşim ilkeleri tartışılmıştır. ÇDS radyoaktif atık bertarafının geliştirilmesi yönünde önerilerde bulunulmuş ve bunun da Çin'de çalışmaların geliştirilmesini teşvik edeceği belirtilmiştir [17].

2019 yılında Rebecca Harms, Wolfgang Neumann ve diğerleri tarafından Dünya Nükleer Atık Raporu hazırlanmıştır. Bu rapor radyoaktif atıkların kaynakları ve sınıflandırılması, atıkların nitelikleri, insan ve çevre için riskler, radyoaktif atık yönetim konseptleri, maliyetler ve finansman ile ülke örnekleri başlıklarını içerecek şekilde oluşturulmuştur [18].

Bu çalışmaların yanı sıra IAEA tarafından 2007 yılında işletmeden çıkarma atıklarının nasıl bertaraf edileceğine dair bir teknik doküman hazırlanmıştır [19]. Bununla beraber IAEA tarafından tıpkı Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı gibi bütün ülkeler için bir radyoaktif atık ve kullanılmış yakıt envanteri hazırlanmıştır [20]. Yine bu kapsamda OECD/NEA tarafından ülkelerin düşük seviyeli radyoaktif atıklarının envanteri için çalışma gerçekleştirilmiştir [21]. Bu çalışmaların yapılmasının ülkeler için gerekli olması sebebiyle ülkemiz içinde bu çalışmalara benzer şekilde hazırlanan ülkemiz envanterini de içeren Ulusal Radyoaktif Atık Planı 2020 yılında yayınlanmıştır [1].

Radyoaktif atık yönetimi ve tesislere dair kaynaklarla beraber maliyetleri oldukça etkileyen belirsizliklerin ve ölçeklendirmenin nasıl yapılacağına dair yayınlarda hazırlanmıştır. Bunlardan belirsizlik ile ilgili olanları, 1999 yılında Edward ve Parsons tarafından yayınlanan radyoaktif atık projelerinde belirsizlik ile 2019 yılında Pedram Danesh-Mand tarafından yayınlanan ve enerji projelerinin tamamında kullanılabilen belirsizliklere dair kılavuzdur [22,23]. Ayrıca yukarıda belirtildiği üzere ölçeklendirmeye dair de 1985 yılında George Woite tarafından nükleer güç santrallerinde yatırım maliyetleri çalışması ile 1986 yılında M.A. Tribe ve R.L.W. Alpine tarafından ekonomik ölçeklendirme ve 0,6 kuralının anlatıldığı çalışma yayınlanmıştır [24,25].

Literatürde yer alan çalışmalar kapsamlı olarak incelendiğinde nükleer alana yeni katılımcı olan

ülkelerin radyoaktif atık yönetimi maliyetlerinin ne olacağına dair belirsizlikleri çözümlendirmeye çalıştığı ve bununla beraber nükleer alanda 50 yıldan fazla tecrübeye sahip olan ülkelerinde ek tesislere ihtiyaç duyması sebebiyle maliyet planları hazırlandığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında literatürden farklı olarak tek bir tesis maliyetine odaklanmak dışında elde edilebilen verilerin ölçeklendirme ilkeleri çerçevesinde en gerçekçi şekilde günümüze uyarlanarak ülkelere bir örnek oluşturulması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda ülkemizin nükleer kurulu güç hedeflerinin bilinen ilk aşaması kullanılarak ülkemize bir yaklaşım sunulmuş diğer ülkeler içinse maliyetlendirmede yüksek aşama maliyetlendirme olarak bilinen ilk örnek hedef maliyeti bulmalarına yardımcı olacak maliyetlendirme formülleri oluşturulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisleri (Near-Surface Disposal Facilities)

Radyoaktif atık yönetiminin uygulama yöntemleri ve ihtiyaçlar farklı radyoaktif atıkların risk potansiyellerine göre belirlenir. Bu potansiyel çıkan iyonlaştırıcı radyasyonun doğası ve yoğunluğundan kaynaklanır [3]. Radyoaktif atıkların belirli özelliklerine ve bunun sonucunda ortaya çıkan güvenlik gerekliliklerine bağlı olarak, farklı atık kategorileri, farklı atık yönetimi yollarına atanır. Çalışma kapsamında olan ÇDS radyoaktif atıklar yüzeyde, kısa ömürlü DOS radyoaktif atık pratikte, yakın yüzeyde veya orta derinlikte nihai bertaraf edildiği belirtilmiştir.

30 metreye kadar olan tesisler yakın yüzey bertaraf tesisi olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada ÇDS radyoaktif atıkların hendek, kısa ömürlü DOS radyoaktif atıkların ise tonoz yapılarında bertaraf edileceği düşünülmüştür [3,4]. YYBT'ler basit, tasarlanmış ve kuyu/saft tipi bertaraf tesisleri olarak sınıflandırılmakta olup başlıklar halinde sunulmuştur.

2.1.1. Basit Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (Simple Near-Surface Disposal Facility)

ÇDS radyoaktif atıkların bertarafı için onlarca yıldır basit hendekler kullanılmıştır. Basit hendek yaklaşımı genellikle yalnızca risk teşkil etmeyecek olan radyoaktif atıklar ve kullanılmayan kaynaklar için uygun kabul edilir. Genellikle bu radyoaktif atıklar 100 ila 300 yıl olarak kabul edilen izleme süresi içinde riskli radyoaktivite seviyesinin altına indiğinden basit YYBT'lerde bertaraf edilmesi uygun görülmektedir [3]. Basit yakın yüzey bertaraf tesislerinden birisi olan Drigg Şekil 1'de gösterilmiştir [15].

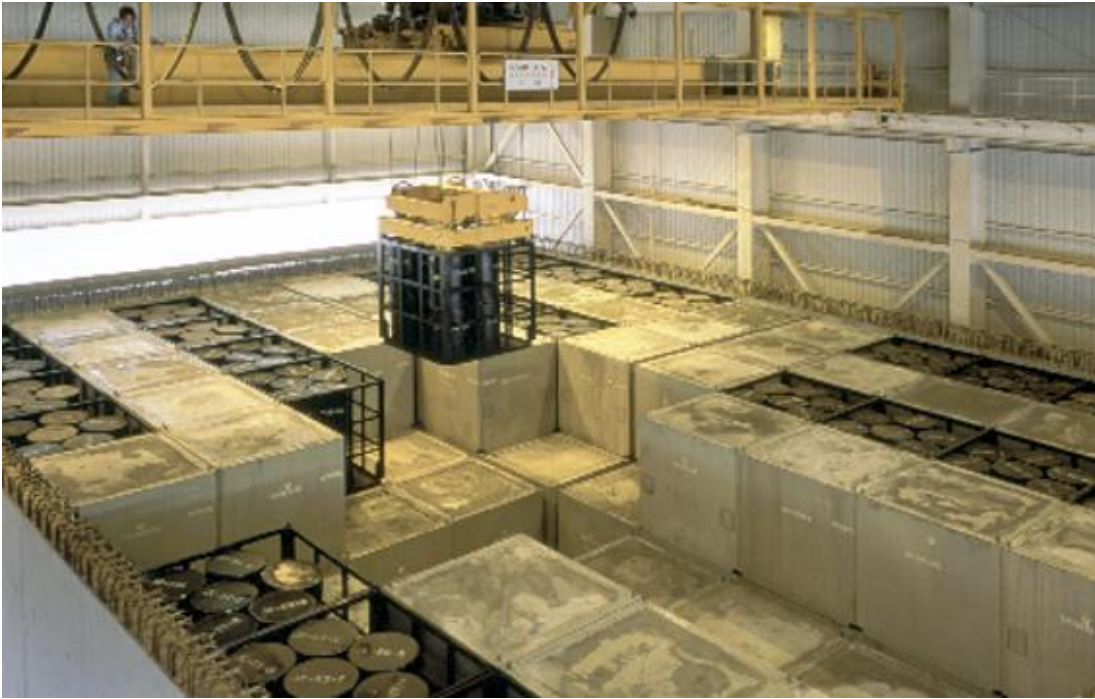


Şekil 1. Basit yakın yüzey bertaraf tesisi (Drigg) [15] (Simple near-surface disposal facility)

2.1.2. Tasarlanmış Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (Engineered Near-Surface Disposal Facility)

Tasarlanmış YYBT'ler, binlerce metreküp kapasiteli oldukça büyük ölçekli olarak planlanmakta basit YYBT'lere benzer ve gelişmiş radyoaktif atık barındırma amaçlarına sahiptirler. Tasarım, radyoaktif atık yerleştirme kolaylığı sağlamayı, sürecin kolay yönetimini ve kapatmada artan verimliliği

amaçlamaktadır. YYBT'nde radyoaktif atığın aktivitesinin bozunma gerçekleşene kadar bekletilmesi, muhtemel doz değerlerinin kabul edilebilir olup olmadığı performans değerlendirmesinde göz önüne bulundurulmalıdır [5,6]. Tasarlanmış yakın yüzey bertaraf tesislerinden birisi olan El-cabril Şekil-2'de gösterilmiştir [26].



Şekil 2. Tasarlanmış yakın yüzey bertaraf tesisi (El-cabril) [26] (Engineered near-surface disposal facility)

2.1.3. Yakın Yüzey Kuyu veya Şaft Tipi Bertaraf Tesisleri (Near-surface Borehole or Shaft Facilities)

Tasarlanmış tesislerin alternatifi veya tamamlayıcısı olan bu bertaraf seçenekleri ekonomik olmakla birlikte insanların izinsiz girişini daha kolay önleme imkânı sağlamaktadır. İstenildiği takdirde ilave hem radyasyondan hem de insan etkilerinden koruma sağlamak için tesislerin tasarımına ve inşasına mühendislik bariyerleri eklenebilmektedir. Tasarlanmış YYBT'lerden daha gelişmiş özelliklere sahip bu tesislerde, kuyu deliğine büyük bir beton tıkaçı veya kapak yerleştirilmesiyle izinsiz girme ihtimalinin azaltılması amaçlanmıştır. Kalınlığı 1 metreyi bulan betonarme kalıplar, istenmeyen girişe karşı caydırıcı olarak düşünülebilmektedir. Böylelikle izleme ve kurumsal kontroller öngörülen 300 yıllık dönemde daha kolay gerçekleştirilebilecektir. Bununla birlikte, yüksek aktiviteli veya daha uzun ömürlü radyoaktif atıkların bertaraf edilmesine olanak sağlamamaktadırlar [5,6].

2.2. Ekonomik Analiz Yöntemleri (Economic Analysis Methods)

Ekonomik analiz gerçekleştirilirken bazı formül, ilke ve yöntemler kullanılmaktadır. YYBT'lerin maliyetlendirilmesi ve ölçeklenmesinde nükleer enerjinin teknik kapsamı ile finansal ilke ve yöntemler birlikte uygulanmalıdır. Finansal ve ekonomik değerlendirmelerin yapılabilmesi için yatırım, bütçe, zaman gibi değerler ile nakit akışı, faiz, enflasyon, iskonto oranı, paranın zaman değeri, bugünkü değer faktörü, net bugünkü değer, fayda masraf oranı, iç kârlılık oranı gibi temel formüller ve ilkeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak temel finansal ifadeler aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

2.2.1. Para-zaman İlişkisi (Time Value of Money)

Para ve zaman kavramı; maliyet, nakit akışı, yatırım, kaldıraç oranları vb. her türlü ekonomik değerlerin belirlenmesinde kullanılan finansal yaklaşımların en temel ilkeleridir. Elde edilecek veya ödemesi gerçekleştirilecek herhangi bir tutarın zamanlaması, hesaplamaların ve sonuçların en doğru şekilde bulunması için oldukça önemlidir. Dolayısı ile paranın bir zaman değeri vardır. Ekonomik hayatta paranın bir kazanç gücü olduğu kabul edilir ve her dönem bunun artacağı düşünülür. Bugün elde edilecek 100 birim gelir, bir ay sonra elde edilecek 100 birim gelirden daha değerlidir [27]. Paranın zaman değerinin hesaplanmasında kullanılan temel bazı öğeler başlıklar halinde verilmiştir.

2.2.2. İskonto Oranı (Discount rate)

Bu oran, yatırım, birikim vb. süreçler için beklenen getiri oranını ifade etmektedir. Kısaca, geleceğe dönük beklentiyi göstermektedir. Dolayısı ile iskonto oranı yatırımcı veya birikimi yapan tarafından öngörülmesi gereken bir değerdir. Bu oran ile gelecekte meydana gelmesi düşünülen nakit akışları bugünkü değere indirgenmektedir.

Geleceğe dönük enflasyon öngörüsü, nakit akışının yapısı ve dağılımı, yatırım veya birikim tutarının süresi, türü ve başlangıç maliyeti vb. unsurlar iskonto oranının belirlenmesinde oldukça önemlidir [27,28,29].

2.2.3. Bugünkü Değer Yöntemi (Present Value Method)

Bugünkü değer yönteminde, yatırım veya birikime her yıl sağlanacak nakit girişleri, belirli bir iskonto oranı üzerinden indirgenerek toplanır. Yatırım veya birikim için yapılacak harcamaların da belirli bir iskonto oranı üzerinden bugünkü değeri bulunur. Yatırım veya birikimin gelirlerinin bugünkü değerlerinden harcamaların bugünkü değeri çıkarılır. Aradaki farkın pozitif olması hedeflenmektedir [30,31]. Nakit girişlerinin belirlenen iskonto oranı ile başlangıç dönemine indirgenmesi için kullanılan eşitlik aşağıda yer almaktadır. Burada r iskonto oranını ifade etmektedir.

$$P = F / (1 + r)^n \quad (3.1)$$

2.2.4. Gelecek Değer Yöntemi (Future Value Method)

Gelecekteki değer metodu net bugünkü değer metodunun bir varyasyonudur. Bir projeye ait nakit girişlerinin gelecekteki değerlerinden, nakit çıkışlarının gelecekteki değerinin çıkarılmasıyla bulunur. Proje veya yatırımda kârlılık bekleniyorsa bu fark belirlenen kâra göre değerlendirilir.

Bu yöntemde her bir akış teker teker geleceğe taşınabileceği gibi belirli akışların birbirleri ile toplanarak veya çıkarılarak topluca geleceğe taşınması da mümkündür. Doğru sonucun elde edilebilmesi için sürecin nakit akışı, ne kadar bir zaman dilimi için planlamanın yapıldığı, o yıla ait faiz oranları ve ortalama faiz oranları, enflasyon değerleri gibi kavramlar dikkate alınarak yöntemin farklı şekillerde uygulanması mümkün olabilmektedir. En basit ifadesiyle eşitlik aşağıda yer almaktadır [30,31].

$$F = P \cdot (1 + r)^n \quad (3.2)$$

2.3. Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerine Maliyet Yaklaşımı (Cost Approach to Near-Surface Disposal Facilities)

2.3.1. Nükleer Güç Santrali İşletme Dönemi Radyoaktif Atık (Radioactive Waste of Operation Period for Nuclear Power Plant)

Bu çalışmada senaryoların doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için teknik veriler doğru bir şekilde ortaya koyulmalıdır. Maliyetlendirme gerçekleştirilirken teknik verilerin oldukça önemli olduğu bilinmelidir. Teknik verilerde tutarsızlık olması, yeterli miktarda araştırma yapılmadan tek kaynaktan verilerin toplanması, maliyetlerin tutarlılığını olumsuz yönde etkileyecektir. YYBT'ler için ihtiyaç duyulan ÇDS ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atık için toplam hacim, yıllık miktar, aktivite değerleri, sınıflandırma, zamanlama, konumlandırma ve belirsizlikler etkin bir şekilde belirlenmelidir. Radyoaktif atık yönetimi konusunun ciddi belirsizlikler içerdiği unutulmamalıdır.

Yapılan literatür araştırmasında, üretilen elektrik değerleri kullanılarak yaklaşık radyoaktif atık miktarlarının hesaplandığı bilinmektedir. Bu çalışmalara göre, hafif sulu basınçlı su reaktörleri için, üretilen GWe başına yıllık yaklaşık 100 m³ ila 300 m³ hacminde DOS radyoaktif atık ortaya çıktığı belirtilmektedir [8,16,32,33,34]. VVER reaktörü özelinde yıllık yaklaşık 600 m³ ÇDS ve DOS radyoaktif atık çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Yeni tip VVER reaktörlerinde ise tasarım aşamasında ve işletim sırasında uygulanan tedbirler ile ortaya çıkan radyoaktif atık miktarının oldukça azaltıldığı belirtilmiştir [35,20].

Akkuyu NGS ÇED Raporu'nda işleme, süper sıkıştırma ve yakma sonrası katı formdaki DOS radyoaktif atıkların yaklaşık 170 m³, geçici depolama tesisine gönderilecek olan yıllık ÇDS radyoaktif atığın 255 m³ olacağı belirtilmiştir [36]. Değerlerin farklılıkları ülkelerin radyoaktif atık yönetimine farklı yaklaşımlarından veya tutucu bir anlayış benimsemelerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, literatürden elde edilen verilerin üzerinden zaman geçtiği ve bu süre içerisinde uygulanan yöntemlerle NGS'lerinde meydana gelen ÇDS ve DOS radyoaktif atık miktarının ciddi oranda azaltıldığı göz önünde bulundurulmuştur.

Eldeki veriler ile son yıllarda uygulanan işleme tekniklerinin tamamı uygulamaya dahil edildiğinde korumacı bir yaklaşım ile yıllık üretilen GWe başına minimum 100 m³ ÇDS, 100 m³ DOS radyoaktif atık çıkabileceği kabul edilmiştir.

2.3.2. Nükleer Güç Santrali İşletmeden Çıkarma Dönemi Radyoaktif Atık (Radioactive Waste of Decommissioning Period for Nuclear Power Plant)

Bir NGS'nin işletmeden çıkarılması, işletmeye alınmasından teorik olarak işletme ömrü olan 60 yıldan sonra başlayacak bir süreç olsa da işletmeye almadan önce işletmeden çıkarma stratejisine sahip olunması ve bertaraf edilmesi gereken atık türleri ve hacimleri üzerine bilgi sahibi olunması önem arz etmektedir. Bunun önemli sebeplerinden birisi öngörülemez durumlarda NGS'nin erken işletmeden çıkarılması durumudur.

İşletmeden çıkarma politikası olarak hemen söküm benimsendiği ve işlemlerin dünyadaki uygulamalara göre 15-25 yıl içinde tamamlanması öngörülmektedir. Reaktörlerin sökülmesi sonucu oluşacak aktive olmuş çelik, beton, kirli ferritik çelik, kirli kaplama, inşaat malzemeleri, kirli teknolojik atıklar ve toprak gibi katı malzemelerden oluşmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı ÇDS, DOS radyoaktif atık sınıfında olup işletme radyoaktif atıkları gibi bertaraf edilebilmektedir. 1 GWe güce sahip tipik bir basınçlı veya kaynar su reaktörünün işletmeden çıkarma radyoaktif atıklarının hacminin yaklaşık 5000-10000 m³ arasında olduğu belirtilmektedir [8].

İsveç'te bulunan 12 NGS için, işletmeden çıkarmadan dolayı oluşan radyoaktif atığın toplam hacminin 150.000 m³ olarak tahmin edilmektedir. Bu radyoaktif atıkların büyük çoğunluğunu paketlenmiş DÜS radyoaktif atıklar oluşturmaktadır. Buhar üreteçleri ve reaktör basınç kapları gibi bazı büyük bileşenlerin paketlenmesi yapılmadan ele alındığı tahmin edilmektedir [19].

Ulusal Radyoaktif Atık Yönetimi Planı'nda, 1 GWe güce sahip tipik basınçlı su reaktöründen işletmeden çıkarma aşamasında ise 3000 m³ ÇDS ve 2100 m³ DOS radyoaktif atığın ortaya çıkacağı tahmin edildiği belirtilmiştir [1]. Sinop'ta kurulması planlanan NGS'nin işletmeden çıkarılması sonrası çıkması beklenen radyoaktif atığa referans olarak alınan durum Sinop NGS Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Raporu'nda verilmiştir. Rapora göre 1 GWe güce sahip basınçlı su reaktörünün işletmeden çıkarılması sonucu korumacı yaklaşım ile paketlenmiş olarak yaklaşık 700 m³ ÇDS, 3000 m³ kısa ömürlü DOS radyoaktif atık ortaya çıkmaktadır [37].

Eldeki veriler ışığında son yıllarda uygulanan işleme tekniklerinin tamamı uygulamaya dahil edildiğinde korumacı bir yaklaşım ile GWe başına 2500 m³ ÇDS, 4500 m³ DOS radyoaktif atık çıkabileceği kabul edilmiştir. Bu veriler Uluslararası Atom Enerji Ajansı'nın beklentisi olan 5000-10000 m³ aralığı ile de uyumludur [8].

2.3.3. Diğer Tesis ve Faaliyetler ile Oluşan Radyoaktif Atık (Radioactive Waste Generated by Other Facilities and Activities)

Nükleer teknoloji sadece elektrik üretimi amacı ile kullanılmamaktadır. Bununla birlikte sağlık, tarım, endüstri, araştırma ve geliştirme alanlarında da nükleer teknolojiden faydalanılmaktadır. Bununla beraber NGS dışında, nükleer alanda faaliyet gösteren madenler, yakıt üretimi için dönüştürme, zenginleştirme, yakıt imalat tesisleri de vardır. Bu tesisler ve faaliyetler neticesinde de radyoaktif atıklar ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın ana konusu olan maliyeti belirleyen unsur aktivite ve hacimdir. NGS dışında faaliyet gösteren tesis ve uygulamalardan çıkacak radyoaktif atıkların hacimleri NGS'ye kıyasla oldukça düşüktür ve zamanlama belirsizdir. Dolayısı ile ülke özelinde bir yaklaşım belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemiz için hazırlanan senaryo analizi başlığında diğer tesis ve faaliyetlerden ortaya çıkacak radyoaktif atık için hali hazırda durum değerlendirilerek bir kabul yapılmıştır.

2.3.4. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Kapasite, Seçim ve Maliyetleri (Near-Surface Disposal Facility Capacity, Selection and Costs)

Diğer ülkeler incelendiğinde farklı türlerde inşa edilmiş YYBT'ler bulunmaktadır. Bu kapsamda tesislerin bulunduğu ülkelerin radyoaktif atık envanterleri ile kıyaslamalar sonucu belirlenen hacimlerin doğruluğunun da saptanması sonrası uygun tesisler seçilmiştir. YYBT olarak Belçika Dessel, İspanya El- Cabril, Çekya Dukovany, Fransa Centre de l'Aube, Macaristan Püspökszlágy,

İngiltere Drigg çalışma kapsamına alınmıştır [22]. Maliyet kırımını yaklaşıma göre değişmektedir. Maliyetler 2024 yılının maliyetleri olmakla birlikte Maliyetlerin kıyaslanabilmesi için ülkelerin işgücünden kaynaklı maliyetlerini standartlaştırmak en doğru yöntemdir. Bu kapsamda Avrupa Komisyonu tarafından hazırlanmış raporda yer alan maaş faktörü tablosuna göre maliyetler yeniden düzenlenecektir. Avrupa içinde ortalama saatlik ücretin 2020 yılı için 30,34 Euro olduğu bilinmektedir. Saatlik ücret değişse de oranlar benzerlik göstereceği için herhangi bir enflasyon çalışması yapılmamıştır [12]. Her ne kadar maaşlara dair katsayı bu rapordan alınsa da rapordaki gibi maliyetlere %100 oranında değil, lisanslama ve planlama ile kapatma da işgücünün maliyete etkisi %50, inşaat ve işletmede işgücünün maliyete etkisi ise %30 olarak kabul edilmiştir. Tablo 1'de maaş faktörü tablosu, Tablo 2'de ise maaş faktörüne göre düzeltilmiş ve düzeltilmemiş YYBT maliyetleri ile teknik detaylar yer almaktadır. Maliyet sütunlarında düzeltilmiş maliyetler üstte ve vurgulu olarak verilmiş düzeltilmemiş maliyetler altta verilmiştir.

Tablo 1. Saatlik Ücrete Göre Düzeltme Faktörü [12] (Hourly Wage-Based Adjustment Factor)

Ülke	Saatlik Ücret (Euro)	Düzeltme Faktörü
Belçika	39,65	1,31
İspanya	21,17	0,70
Çekya	11,27	0,37
Fransa	35,97	1,19
Macaristan	9,11	0,30
İngiltere	25,68	0,85

Tablo 2. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisleri, Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Maliyetleri [12,22] (Near Surface Disposal Facilities, Adjusted and Unadjusted Costs)

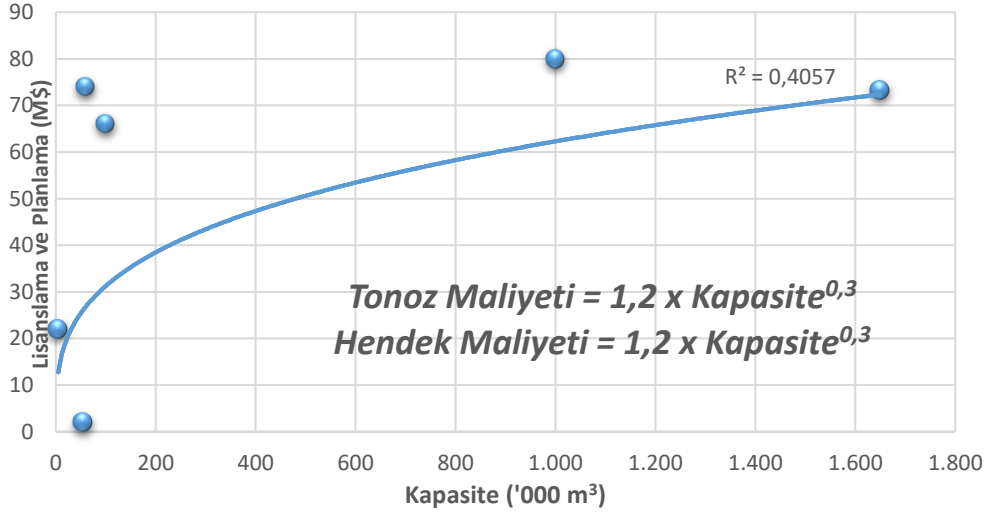
Ülke / Tesis	Atık Kabul / Bertaraf Methodu	İlk Bertaraf (yıl)	Tesis Kapasitesi (m ³) / Yıllık teslim (m ³ /yıl)	Lisans ve Planlama Maliyeti (M\$)	İnşaat Birim Maliyeti (\$/m ³) / İşletme Birim Maliyeti (\$/m ³)	Kapatma Maliyeti (M\$)
Belçika/ Dessel	DOS-KÖ / Tonoz	60000 / 1000	65 74	6140 / 14290 6610 / 15382	212 240
İspanya/ El- Cabril	ÇDS, DOS-KÖ / Tonoz	1993	100000 / 5000	80 66	3541 / 5075 3138 / 4497	182 150
Çekya / Dukovany	DOS-KÖ / Tonoz (5m)	1994	55000 / 310	1648 / 3217 1091 / 2129	124 67
Fransa/Centre de l'Aube	DOS-KÖ / Tonoz	1992	1000000 / 20000	74 80	1047 / 5147 1100 / 5406	303 330
Macaristan /Püspökszlágy	DÜS / Tonoz (6m)	1976	5000 / 237	48 22	4539 / 7599 2670 / 4470	17 8
İngiltere/ Drigg	ÇDS,DÜS/ Hendek ve Tonoz	1959-1988	1650000 / 12000	80 73	768 / 2895 729 / 2749	433 398

2.3.5. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Maliyetleri için Ölçeklendirme (Scaling for Near-Surface Disposal Facility Costs)

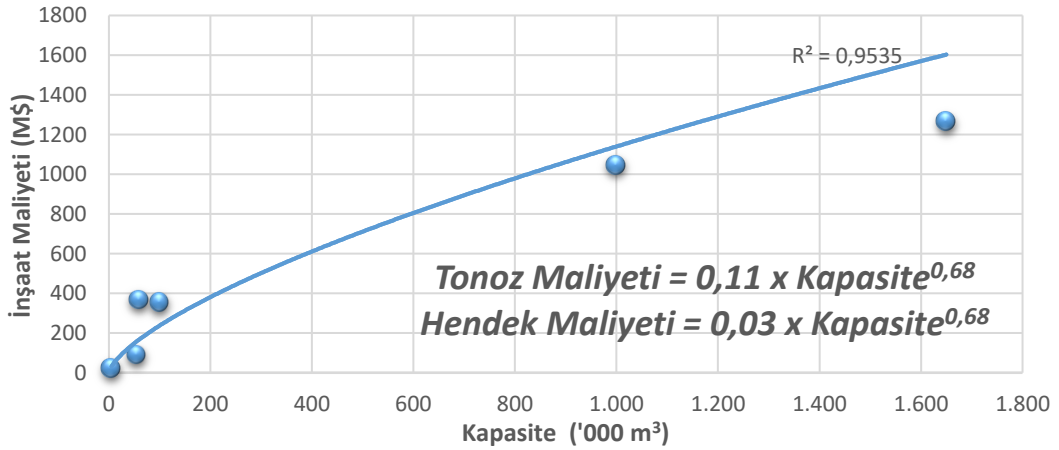
Tesislerin maliyetleri hesaplanırken ilk aşama da yaklaşık olarak ne kadar bir tutar ile karşılaşılacağı örnek tesislerin maliyetlerinin bulunması ve ölçeklendirilmesi ile tespit edilir. Ölçeklendirme yasası ciddi tasarım değişiklikleri olmadığı durumda daha net sonuçlar vermektedir. Literatürde yer alan birçok maliyet çalışmasında tek bir ölçeklendirme değeri kabul edilerek sonuçlara gidilmiştir. Bu çalışmada ise lisanslama ve planlama, inşaat, işletme ve kapatma maliyetleri için ayrı ayrı ölçeklendirme grafikleri

oluşturularak formüller tespit edilmiştir.

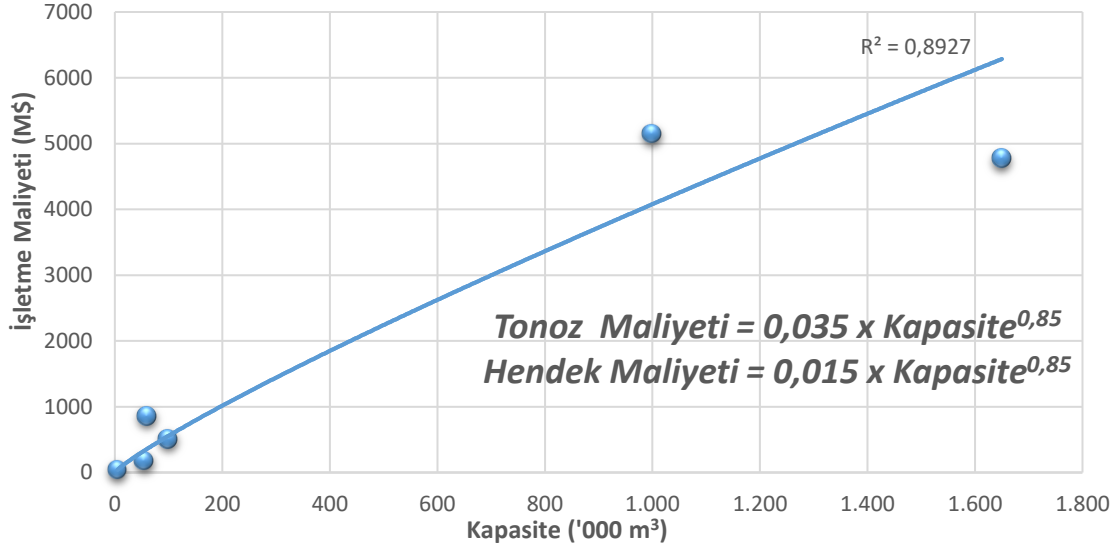
Grafik üzerinde yer alan katsayılar DOS radyoaktif atıkların bertaraf edildiği tonoz yapılar için ve ÇDS radyoaktif atıkların bertaraf edileceği hendek yapılar için ayrı ayrı verilmiştir. Grafik üstündeki formüllere %20 belirsizlik maliyeti eklenmiştir [23,24]. Burada yer alan işletme maliyeti grafiğine hendek için kapatma sonrası 100 yıl, tonoz için kapatma sonrası 200 yıl izleme maliyeti dahildir. Yıpranmaya dair herhangi bir kabul kullanılmamıştır. Lisanslama ve Planlama Maliyeti Şekil 3'te, İnşaat Maliyeti Şekil 4'te, İşletme Maliyeti Şekil 5'te, Kapatma Maliyeti ise Şekil 6'da grafik olarak formülleri ile gösterilmiştir.



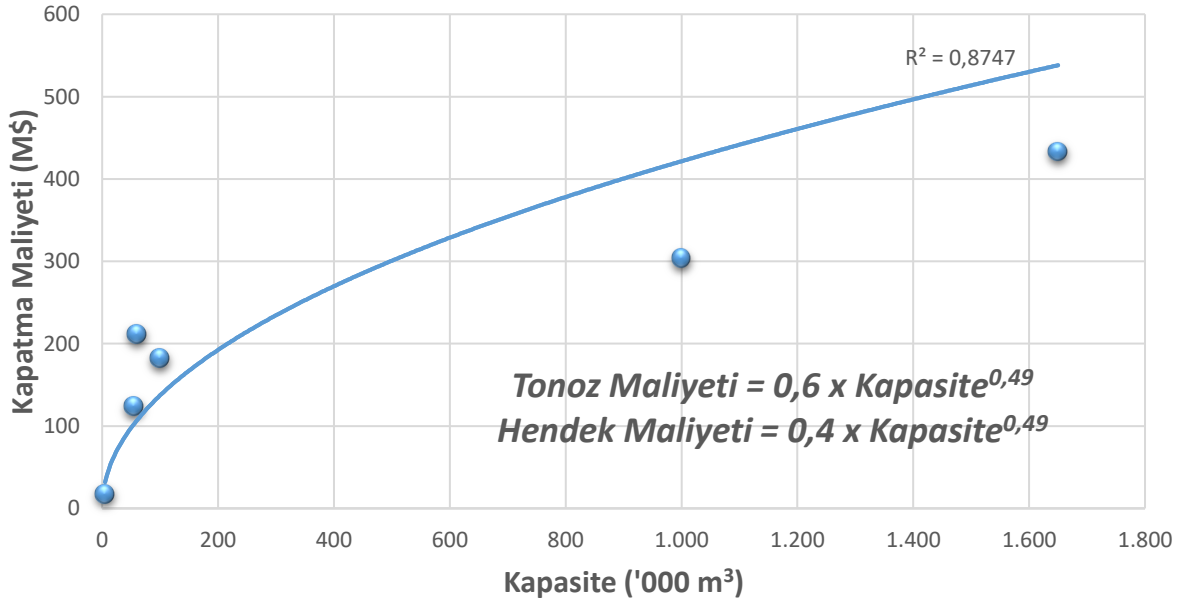
Şekil 3. Lisanslama ve Planlama Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Licensing and Planning Cost Scaling Chart)



Şekil 4. İnşaat Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Construction Cost Scaling Chart)



Şekil 5. İşletme Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Operating Cost Scaling Chart)



Şekil 6. Kapatma Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Closure Cost Scaling Chart)

Toplam maliyet hesaplanırken literatürde yer alan diğer maliyet çalışmaları gibi bir ölçeklendirme katsayısı kullanılmak istenirse maliyetlerdeki ağırlıklar dikkate alınarak [0,65-0,75] aralığının uygun olacağı görülmüştür [24,25].

3. SENARYO ANALİZİ VE TARTIŞMA (SCENARIO ANALYSIS AND DISCUSSION)

Ülkemizde kurulması planlanan 3 büyük ölçekli NGS projesi bulunmaktadır. Maliyet değerlendirmesi için 2 NGS yani 8 büyük ölçekli ve 3 NGS yani 12 büyük ölçekli reaktör için 2 ayrı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolara göre yaklaşık olarak 10 GWe ve 15 GWe kurulu güç baz alınmıştır.

1 GWe kurulu güce sahip nükleer reaktörün işletilmesi esnasında ortaya çıkan radyoaktif atık için ise 100 m³ ÇDS / 100 m³ DOS, 150 m³ ÇDS / 150 m³ DOS ve 200 m³ ÇDS / 200 m³ DOS olmak üzere 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bununla beraber reaktörün işletmeden çıkarılması esnasında 2500 m³ ÇDS, 4500 m³ DOS radyoaktif atık çıkacağı kabul edilmiştir. Ayrıca diğer tesis ve faaliyetler esnasında günümüze kadar meydana gelen radyoaktif atık hacimleri ile araştırma reaktörünün de işletmeden çıkarılması da dikkate alınarak toplamda maksimum 5000 m³ ÇDS ve 5000 m³ DOS radyoaktif atık meydana geleceği kabulü yapılmıştır. Toplamda 6 farklı senaryo için maliyetler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Gecelik Maliyeti İçin Senaryo Analizi (M\$) (Scenario Analysis for Near-Surface Disposal Facility Overnight Cost)

	2 Nükleer Güç Santrali (10 GWe)			3 Nükleer Güç Santrali (15 GWe)		
	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS
Toplam Hacim (*000 m ³)	Hendek: 84 Tonoz: 104	Hendek: 111 Tonoz: 131	Hendek: 138 Tonoz: 158	Hendek: 124 Tonoz: 154	Hendek: 164 Tonoz: 194	Hendek:205 Tonoz: 235
Lisans/ Plan	74	80	85	84	90	96
İnşaat	351	413	471	457	539	616
İşletme	767	1074	1269	1215	1499	1774
Kapatma	276	312	344	334	378	417
Toplam	1468	1879	2169	2089	2506	2903

Ülkemiz için radyoaktif atık yönetimi planlaması gerçekleştirilirken tabloda yer alan YYBT maliyetleri ve süreç planlaması oldukça önemlidir. Tabloya göre 2 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde minimum 1.5 Milyar Dolara, 3 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde ise minimum 2.1 Milyar Dolara ihtiyaç duyulacağı tespit edilmiştir. Finansman çalışması gerçekleştirilirken 2 veya 3 NGS seçeneğine göre her 3 alt senaryo içinde

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Nükleer teknolojiye sahip ülkeler radyoaktif atık yönetimini doğru bir şekilde yapmanın çabası içerisinde olmalıdırlar. Radyoaktif atık yönetiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için maliyetlendirmenin doğru bir şekilde yapılması ve finansmanın nasıl ve ne şekilde sağlanacağını belirlenmesi oldukça önemlidir.

Özellikle NGS bulunan ülkelerde ÇDS ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atıklar için çözümün NGS'nin işletilmesinin ilk yıllarında belirlenmesi gerekmektedir. Bu radyoaktif atıkların bertarafı YYBT'lerde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda literatürden farklı olarak dünya üzerinde örnekleri bulunan bu tesislerin maliyet kısımları net bugünkü değer yöntemi ve maaş faktörü kullanılarak formüle edilmiştir. Literatürde yer aldığı gibi tek bir ölçeklendirme faktörü kullanmak yerine maliyetler üzerinde çalışarak ölçeklendirme faktörü lisans ve planlama için 0,3, inşaat için 0,68, işletme ve uzun süreli izleme için 0,85 ve kapatma için ise 0,49 olarak bulunmuştur. Bunlarla beraber pratik ve ilk aşamalarda kullanılmak üzere genel ölçeklendirme faktörü aralığı 0,65 – 0,75 olarak tespit edilmiştir.

çalışma yapılması önerilmektedir. Bu rakamlar belirsizlikleri içerecek şekilde gecelik maliyet olup maliyet kısımları planlaması, sürece göre değişiklik göstermektedir. Finansman yöntemi kirleten öder prensibi doğrultusunda radyoaktif atık üretenden alınarak havuz oluşturmaya dayanmaktadır. Ülkemizde toplanan bu paraların yatırım araçları ile değerlendirilmesi planlanmaktadır.

Ölçeklendirme faktörünü de içerecek şekilde geliştirilmiş formüller ile ülkemiz için senaryo analizi çalışması yapılmıştır. Literatürde yüksek seviye maliyet hesaplamalarında %30 - %50 olarak alınan belirsizlik, literatürden farklı olarak daha gerçekçi sonuçlar için %20 olarak alınmıştır. Bu senaryolar kurulu güç bakımından 2 NGS (10 GWe) ve 3 NGS (15 GWe) olarak meydana gelen radyoaktif atık bakımından ise 100 m³ ÇDS / 100 m³ DOS, 150 m³ ÇDS / 150 m³ DOS ve 200 m³ ÇDS / 200 m³ DOS şeklinde kabul edilmiştir. Sonuç olarak 2 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde gecelik maliyetin minimum 1,5 Milyar Dolar maksimum 2,2 Milyar Dolar, 3 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde ise gecelik maliyetin minimum 2,1 Milyar Dolar maksimum 2,9 Milyar Dolar olacağı öngörülmüştür.

Kısacası, literatürden farklı yaklaşımlarla ülkemiz özelinde hazırlanan bu çalışma radyoaktif atık yönetimi maliyet tahminlerinin doğruluğu konusunda sonuca ulaşamayan diğer ülkeler içinde yol gösterici olacaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıdaki önerilere,

- Çalışmada yer alan örnek tesisler dışında kalan başka tesislerin maliyetleri kullanılırken maaş faktörünün doğru bir şekilde kullanılması,
- İşletme maliyeti hesaplanırken işletme süresinin ve kapatma sonrası izleme süresinin belirleyiciliğinin ihmal edilmemesi,
- Toplam radyoaktif atık hacmi ve yıllık miktarı hesaplanırken tek bir kabul ile değil senaryolar ile hesaplamalara yer verilmesi,
- Toplam radyoaktif atık hacmi hesaplanırken hali hazırda bulunan radyoaktif atık envanteri ve işletmeden çıkarma esnasında ortaya çıkacak radyoaktif atıkların da dahil edilmesi,
- Maliyet hesaplamalarındaki aşamalara göre belirsizliklerin maliyetlere eklenmesi,

dikkat edilmesinde fayda görülmektedir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

ÇDS : Çok Düşük Seviyeli

DÜS : Düşük Seviyeli

DOS : Düşük ve Orta Seviyeli

F : Gelecek Değer

NGS : Nükleer Güç Santrali

P : Bugünkü Değer

r : İskonto Oranı

UAEA : Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

YYBT : Yakın Yüzye Bertaraf Tesisi

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)

Semih Sadi KILIÇ: Literatür araştırması, senaryoların oluşturulması ve analiz edilmesi ile çalışmanın yazımında rol almıştır.

He played a role in the writing of the study by conducting literature research, creating and analyzing scenarios.

Halil İbrahim VARIYENLİ: Çalışmanın kontrolü ve yayınlanma sürecinin takibinde rol almıştır.

He played a role in the control and follow-up of the study's publication process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TENMAK, Ulusal Radyoaktif Atık Yönetimi Planı, 2020
- [2] IAEA, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, IAEA TECDOC-1817, 2017
- [3] Jürgen K., WOLFGANG N., DETLEF A., Nuclear Fuel Cycle, Heinrich Böll, 2006
- [4] STRLSCHVO, Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Fassung der Bekanntmachung vom, 2001
- [5] IAEA, Scientific and Technical Basis for the Near-surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 412, 2002
- [6] IAEA, Considerations in the Development of Near-surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 417, 2003
- [7] IAEA, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, 2004
- [8] IAEA, Options for Management of Spent Fuel and Radioactive Waste for Countries developing New Nuclear Power Programmes, 2013
- [9] IAEA, Costing Methods and Funding Schemes for Radioactive Waste Disposal Programmes, 2020
- [10] OECD/NEA, The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, 2013
- [11] Avrupa Komisyonu, Methodologies of Cost Assessment for Radioactive Waste and Spent Fuel Management an Overview of The Practices, 2020
- [12] P. Carbol, J. Faltejsek, I. Mele ve diğerleri, Guidance on Cost Assessment and Financing Schemes of Radioactive Waste Management Programmes, 2020
- [13] Micheal I. Ojovan ve Hans J. Steinmetz, Approaches to Disposal of Nuclear Waste, 2022
- [14] Fan Xia, Jiyun Zhao ve diğerleri, Dynamic cost analysis for disposal of low and intermediate level nuclear waste in China, 2020
- [15] US DoE, International Low Level Waste Disposal Practices and Facilities, 2011
- [16] US DoE, Integrated Data Base Report: U.S. Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics, 1997
- [17] Haiying Chen, Chunming Zhang ve

- diğerleri, Discussion on Very Low-Level Radioactive Waste near Surface Disposal, 2013
- [18] Rebecca Harms, Wolfgang Neumann ve diğerleri, The World Nuclear Waste Report, 2019
- [19] IAEA, TECDOC 1572 Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste, 2007
- [20] IAEA, Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials, 2008
- [21] OECD/NEA, Low-level Radioactive Waste Repositories, 1999
- [22] Edward L. Parsons, J., Waste Management Project Contingency Analysis, 1999
- [23] D. Pedram, Risk Engineering Society Contingency Guideline, 2019
- [24] W. Georg, Capital Investment Costs of Nuclear Power Plants, 1985
- [25] M.A. Tribe, R.L.W. Alpine, Scale Economies and the "0.6 rule", Engineering Costs and Production Economics, 1986
- [26] İnternet: El-Cabril Tesisi Resmi Sayfası URL:
<https://www.enresa.es/eng/index/activities-and-projects/el-cabril> Son Erişim Tarihi:18.12.2023
- [27] Tutar H., İşletme Yönetimi, Seçkin, İstanbul, 2015
- [28] Okka M., Proje Yönetimi ve Mühendislik Ekonomisi, KTO, Konya, 2017
- [29] Erdem H., Yatırımların Ekonomik Değer Ölçümü, YTÜ, İstanbul, 2020
- [30] Ay S., Elektrik Enerjisi Ekonomisi, Birsen, İstanbul, 2008
- [31] Yaşar N., Finansal Yönetim ve Mali Analiz, Seçkin, İstanbul, 2015
- [32] Murray R., Understanding Radioactive Waste, Edited by Judith A. Powell, Columbus: Battelle Press, 1994
- [33] OECD-NEA, Radioactive Waste in Perspective NEA No. 6350, 2010
- [34] West PJ., Waste Management for Nuclear Power, 1999
- [35] IAEA, Improvements of Radioactive Waste Management at WWER Nuclear Power Plants, 2006
- [36] Akkuyu NGS Elektrik Üretim A.Ş., 4.800 MWe Kurulu Gücünde Olan Akkuyu Nükleer Güç Santrali Projesi Nihai ÇED Raporu, 2014
ICC, Sinop NGS Projesi, Sinop Nükleer Güç Santrali Projesi Nihai ÇED Raporu, 2020

Optimization of Array Design in Photovoltaic Power Plants Using the Taguchi and ANOVA Analysis

Oğuz Kaan ÇİNİCİ*¹ , Adem ACIR¹ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara/Türkiye

Article Info

Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 24/12/2023
Accepted: 24/12/2023

Keywords

ANOVA
Optimization
Photovoltaic (PV)
PVsyst
Taguchi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 24/12/2023
Kabul: 24/12/2023

Anahtar Kelimeler

ANOVA
Optimizasyon
Fotovoltaik (FV)
PVsyst
Taguchi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigated eight PV solar power plant designs with varying array configurations and PV types. Using PVsyst simulations, the most suitable design was determined to be 3-portrait and bifacial PV. Taguchi and ANOVA analyzes highlighted the significant impact of PV type (65.27%) and array configuration (34.72%) on plant performance. / Bu çalışma, değişen dizi konfigürasyonlarına ve PV tiplerine sahip sekiz PV güneş enerjisi santrali tasarımı araştırmıştır. PVsyst simülasyonlarını kullanarak en uygun tasarımı 3-dikey ve çift yüzeyli PV olarak tespit edilmiştir. Taguchi ve ANOVA analizleri, PV tipinin (%65,27) ve dizi konfigürasyonunun (%34,72) tesis performansı üzerindeki önemli etkisini vurgulanmıştır.

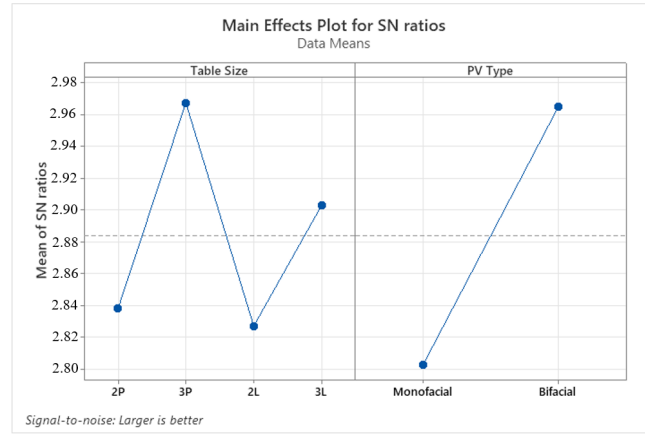


Figure A: Main effects plot for SN ratios /Şekil A: SN oranları için ana etki grafiği

Highlights (Önemli noktalar)

- Studied eight PV solar power plant designs with varied array configurations and PV types. / Çeşitli dizi konfigürasyonları ve PV tipleri ile sekiz PV güneş enerjisi santrali tasarımı üzerinde çalışıldı.
- Leveraged PVsyst software for simulations, evaluating E-grid, PR, and CO₂ emissions. / Simülasyonlar, E-şebekesi, PR ve CO₂ emisyonlarının değerlendirilmesi için PVsyst yazılımından yararlandı.
- ANOVA analysis emphasized the significant impact of PV type (65.27%) and array configuration (34.72%) on plant efficiency. / ANOVA analizi, PV tipinin (%65,27) ve dizi konfigürasyonunun (%34,72) sistem verimliliği üzerindeki önemli etkisini vurguladı.

Aim (Amaç): Optimize PV solar power plant efficiency through diverse design parameters. / Çeşitli tasarım parametreleriyle PV güneş enerjisi santralinin verimliliğini optimize edilmesi.

Originality (Özgünlük): Diverse PV designs, configurations, and analyses pinpoint optimal efficiency-enhancing parameters for sustainability. / Çeşitli PV tasarımları, konfigürasyonları ve analizleri, sürdürülebilirlik için verimliliği artıran optimum parametreleri belirler.

Results (Bulgular): Optimal PV plant design is 3-P with bifacial panels, emphasizing their substantial contributions to efficiency. / En uygun PV tesisi tasarımı, çift yüzeyli panellere sahip 3-P'dir tasarımıdır ve bu panellerin verimliliğe önemli katkıları vurgulanmıştır.

Conclusion (Sonuç): Optimal PV solar power plant design involves 3-P arrays and bifacial panels, emphasizing their substantial contributions to efficiency, sustainability, and performance variability. / Optimum PV güneş enerjisi santrali tasarımı, 3-P dizileri ve iki yüzeyli panelleri içerir ve bunların verimliliğe, sürdürülebilirliğe ve performans değişkenliğine önemli katkıları vurgulanmıştır.



Optimization of Array Design in Photovoltaic Power Plants Using the Taguchi and ANOVA Analysis

Oğuz Kaan ÇİNİCİ*¹ , Adem ACIR¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara/Türkiye

Article Info

Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 24/12/2023
Accepted: 24/12/2023

Keywords

ANOVA
Optimization
Photovoltaic (PV)
PVsyst
Taguchi

Abstract

Fossil fuels, predominant in fulfilling current energy demands, are implicated in global warming, prompting a global shift towards renewable energy sources. Among these, photovoltaic (PV) solar power plants have garnered significant attention, experiencing a rapid surge in installed power capacity. However, a notable drawback of PV solar power plants is their considerable spatial footprint, emphasizing the pivotal role of efficient space utilization and shading mitigation in their design. Notably, pitch distance, array design, and PV type emerge as critical parameters influencing the performance of these power plants during installation. In the present study, eight distinct PV solar power plant designs were conceptualized, incorporating four different PV array configurations (2P-3P-2L-3L) and two PV types (monofacial-bifacial), each with specified orientations (portrait-landscape). Other parameters were held constant across designs. Leveraging PVsyst software, simulations were conducted for each design, yielding crucial performance metrics, including the annual energy output delivered to the grid (E-grid), performance ratio (PR), and associated CO₂ emissions. Subsequently, a Taguchi analysis facilitated optimization based on these results. The outcome of this analysis identified the optimal PV array design as 3P and the optimal PV type as bifacial. Further insight was gained through an ANOVA analysis, revealing the substantial contributions of parameters to overall variability. Specifically, PV type exhibited a significant contribution of 65.27%, while PV array configuration contributed 34.72% to the observed variability in plant performance. These findings not only enhance the understanding of PV power plant design intricacies but also underscore the paramount significance of array design in achieving heightened efficiency and sustainability.

Taguchi ve ANOVA Analizi Kullanılarak Fotovoltaik Enerji Santrallerinde Dizi Tasarımının Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 24/12/2023
Kabul: 24/12/2023

Anahtar Kelimeler

ANOVA
Optimizasyon
Fotovoltaik (FV)
PVsyst
Taguchi

Öz

Mevcut enerji taleplerinin karşılanmasında ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtlar, küresel ısınmaya neden olmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru küresel bir yönelime yol açmaktadır. Bunlar arasında fotovoltaik (PV) güneş enerjisi santralleri büyük ilgi görmüş ve kurulu güç kapasitesinde hızlı bir artış yaşanmıştır. Bununla birlikte, PV güneş enerjisi santrallerinin kayda değer bir dezavantajı, fazla alan kaplamalarıdır; bu da tasarımlarında verimli alan kullanımının ve gölgelemenin azaltılmasının önemli rolünü vurgulamaktadır. Özellikle aralık mesafesi, dizi tasarımı ve PV tipi, bu enerji santrallerinin kurulum sırasında performansını etkileyen kritik parametreler olarak ortaya çıkıyor. Bu çalışmada, dört farklı PV dizi konfigürasyonunu (2P-3P-2L-3L) ve iki PV tipini (tek yüzlü-çift yüzlü) içeren ve her biri belirli yönelimlere (dikey-yatay) sahip sekiz farklı PV güneş enerjisi santrali tasarlanmıştır. Diğer parametreler tasarımlarda sabit tutuldu. PVsyst yazılımından yararlanılarak her tasarım için simülasyonlar gerçekleştirildi ve şebekeye iletilen yıllık enerji çıkışı (E-şebeke), performans oranı (PR) ve ilgili CO₂ emisyonları dahil olmak üzere önemli performans ölçümleri elde edildi. Daha sonra, bir Taguchi analizi bu sonuçlara dayalı optimizasyonu kolaylaştırdı. Bu analizin sonucu, en uygun PV dizisi tasarımını 3P ve en uygun PV tipini iki yüzeyli olarak tanımladı. ANOVA analizi yoluyla daha fazla bilgi elde edildi ve parametrelerin genel değişkenliğe önemli katkıları ortaya çıktı. Spesifik olarak, PV tipi %65,27'lik önemli bir katkı sergilerken, PV dizi konfigürasyonu tesis performansında gözlenen değişkenliğe %34,72 oranında katkıda bulunmuştur. Bu bulgular yalnızca PV enerji santrali tasarımının karmaşıklıklarının anlaşılmasını geliştirmekle kalmıyor, aynı zamanda yüksek verimlilik ve sürdürülebilirliğe ulaşmada dizi tasarımının büyük öneminin altını çiziyor.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In the relentless pursuit of technological advancement and meeting the ever-increasing global energy demand, developing and deploying efficient and sustainable energy sources have become imperative. The pressing need for cleaner alternatives arises from the recognition that traditional energy sources, predominantly fossil fuels, are finite and pose significant environmental threats. The detrimental effects of fossil fuels on the environment have propelled the world into a paradigm shift, as underscored by international initiatives such as the Paris Climate Agreement [1]. Nations across the globe are now actively transitioning towards clean and renewable energy sources to mitigate climate change and build a sustainable future [2]. The growing consensus on the need for a green energy revolution drives substantial investments and research efforts toward renewable energy technologies. Among these technologies, photovoltaic (PV) solar power plants have emerged as a critical player in the global transition to clean energy [3], [4]. Harnessing the sun's abundant and renewable energy, PV power plants convert sunlight into electricity through the photovoltaic effect. As countries increasingly adopt renewable energy as a cornerstone of their energy portfolios, the efficiency and optimization of PV power plants become critical for realizing the full potential of solar energy [4]-[9].

The design and efficiency of PV power plants are pivotal considerations in the quest for optimal energy output. As these installations continue to scale up, the challenges associated with large-scale deployment become increasingly complex. Factors such as orientation, array design, and shading can significantly impact the performance of solar panels in a PV power plant. Consequently, researchers and engineers are turning to advanced simulation tools to model and analyze the behavior of PV systems under various conditions [10]-[14]. Software programs like PVsyst have become indispensable tools for simulating and optimizing PV systems. These programs allow for the detailed analysis of a range of parameters, including solar irradiance, temperature, and shading effects, enabling engineers to assess the performance of PV power plants in diverse environmental conditions. Simulation-based studies contribute valuable insights into system behavior, aiding in the refinement of design parameters and identifying optimization opportunities [15]. Among the numerous design considerations in PV power plants, the designs of arrays have particular significance. The optimization of array design is

essential to mitigate challenges associated with large areas, shading effects, and other inefficiencies inherent in PV power plants.

Optimization ensures the system operates at peak efficiency, maximizing energy yield and minimizing operational costs. In this context, statistical methods such as the Taguchi method and Analysis of Variance (ANOVA) provide a systematic and structured approach to identifying and optimizing critical design parameters [16]-[20]. The Taguchi method, developed by Genichi Taguchi, is a robust statistical approach widely used for optimizing processes and designs. It enables engineers and researchers to identify the optimal combination of factors and their levels within a design space, minimizing variation and maximizing performance. This method is particularly valuable in the context of PV power plants, where a multitude of factors can influence overall efficiency [21],[22]. Complementing the Taguchi method, Analysis of Variance (ANOVA) is a statistical technique used to analyze a dataset's variability and quantify individual factors' contributions. ANOVA provides a rigorous statistical foundation for validating the significance of factors identified by the Taguchi method, enhancing the understanding of how different design parameters interact and impact overall system performance. There are many studies in the literature on design optimizations of PV power systems.

Kowsar et al. endorse floating solar photovoltaic (FSPV) systems as a remedy for challenges in large-scale ground-mounted photovoltaic power generation in densely populated areas. Utilizing PVsyst simulation tools, the study centers on a 50 MW FSPV power plant in a swamp region of an extremely densely populated country. Results indicate a competitive levelized cost of energy (LCOE) at US\$0.051/kWh, notably lower than fossil fuel-based power plants at US\$0.087/kWh in the case study country. The FSPV system exhibits environmental benefits, including reduced CO₂ emissions, diminished water evaporation, and preservation of biodiversity in swamp areas. This underscores the economic viability and positive environmental impact of FSPV as a promising alternative for energy production in densely populated regions with limited land resources [11].

Shan Hu et al. investigated the impact of dust accumulation on photovoltaic (PV) module efficiency, addressing the limitations of existing research that predominantly relied on field experiments and numerical simulations without comprehensive three-dimensional (3D) models. The

study introduced proposed conditions for powder adsorption and developed a 3D simulation model to analyze settling factors. The authors optimized installation parameters through zonal clustering, revealing in a case study that a 17° angle and 0.5 m installation height maximized energy production in a category I zone. This underscores the significance of accounting for regional variations in optimizing PV module performance [10].

Tashtoush et al. aimed to create an environmentally sustainable living system for residential buildings by optimizing grid-connected and off-grid photovoltaic (PV) systems, focusing on reducing carbon emissions. The study centers on a typical residential building with ten apartments, employing a rooftop PV system modeled with BEopt and simulated using PVSyst software. After assessing various optimization scenarios, the study determines that a 10.6 kWh battery storage system, with a 5.7-year payback period and high net present value, covering over 95% of the electric load, is optimal. If widely adopted in Jordan, this model could potentially reduce carbon dioxide emissions by approximately 5.33 million metric tons, highlighting its environmental and economic benefits [12].

Irshad et al. assessed the performance of three PV technologies—monocrystalline silicon (m-Si), polycrystalline silicon, and amorphous silicon—with the goal of designing optimal PV-based hybrid systems. Following IEC 61724 metrics, m-Si demonstrated superior performance, with an annual array efficiency of 5.26 hours/day, a capacity factor of 14.31%, and a performance ratio of 83.9%. The recommended system configuration involves a 72.8 kW grid-connected PV and a 59.4 kW converter, with a total Net Present Cost (NPC) of \$397,684, translating to \$0.0493/kWh. Despite variations in sensitivity, the system proves resilient, offering valuable insights for researchers planning efficient PV-based hybrid systems [13].

Ihaddadene et al. highlights Algeria's commitment to green energy, particularly solar, utilizing the PVPA-1 calculation code. The case study investigates a 15 MW photovoltaic power plant in Tamanrasset, Algeria, for 2018. Results showcase PVPA-1's effectiveness in evaluating performance parameters, yielding reference, array, and final yields of 6 hours, 4.63 hours, and 4.58 hours, respectively. The tool identifies low system losses (0.052 hours) and peculiar behavior in subfield 9, impacting the overall power plant performance. In conclusion, PVPA-1 emerges as a robust tool for

comprehensive performance analysis of photovoltaic installations [14].

Bayyigit et al. compared monofacial and bifacial solar panels using PVSyst software in two solar power plants in Ankara. The study revealed that bifacial panels outperformed single-sided ones, showing a 13% higher average annual energy production. The albedo effect and CO₂ emissions were also analyzed, highlighting the environmental benefits of bifacial panels. The results suggest that promoting bifacial solar panel systems could be crucial for more efficient and sustainable energy production [23].

In this study aims to contribute to the ongoing discourse on optimizing PV power plant design by integrating the Taguchi method and ANOVA analysis. We use PVSyst software to analyze key design parameters related to array dimensions and PV types. The objective is to identify optimal configurations that maximize annual electrical energy production, and minimize CO₂ emissions, contributing to a more sustainable and efficient PV power plant design. Our study's originality lies in the synergy of the Taguchi method and ANOVA analysis, providing a systematic and statistically validated approach to optimize array design in photovoltaic power plants. This integrated methodology contributes a unique angle to the existing body of research in the field.

2. PVSYST SOFTWARE (PVSYST YAZILIMI)

Photovoltaic (PV) solar energy systems are gaining popularity as renewable energy sources in both residential and commercial settings. These systems convert sunlight into electrical energy using solar panels, and to enhance their efficiency, accurately modeling and simulating their performance under various conditions is crucial. A widely utilized software tool for this purpose is PVSyst, which PVSyst SA developed. It models and simulates the performance of photovoltaic solar energy systems by incorporating inputs such as weather data, system design parameters, and component specifications to predict system performance under diverse conditions. PVSyst is versatile, and capable of simulating both grid-connected and off-grid PV systems, accommodating different sizes and configurations [15], [22], [24], [26].

Design Optimization: PVSyst is instrumental in optimizing PV system design by simulating performance under varying configurations. The software evaluates different designs, including changes in panel orientation, tilt angle, and shading,

to identify the optimal design for a specific location and application.

Performance Analysis: PVsyst facilitates the analysis of existing PV systems, comparing actual and predicted performance data to pinpoint discrepancies or issues. This analysis aids in identifying areas for improvement and optimizing overall system performance.

Financial Analysis: PVsyst supports financial analysis by estimating energy production and revenue generation. The software calculates vital financial metrics such as payback period, internal rate of return, and net present value, providing insights into the financial viability of a project.

Energy Yield Prediction: PVsyst predicts the energy yield of a PV system under different conditions, considering factors like weather patterns, shading, and system design. It estimates energy generation for a specific location, aiding in effective system planning.

System Configuration: PVsyst creates the panel array and adjusts panel slopes depending on the

system's power. It fine-tunes both panel tilt and azimuth angles, with the azimuth angle representing the angle between the south/north and the collector plane. Inverter selection aligns with the created string, and the simulation is conducted after the system setup is complete [15].

3. PROJECT DESIGN (PROJE TASARIMI)

In the realm of photovoltaic (PV) power system design, the efficacy of the system is linked to various parameters, including location, PV and inverter type, array design, and array stand inclination angle. This study focuses on assessing the impact of these parameters on system performance, mainly through exploring four distinct array designs utilizing both monofacial and bifacial PVs. The objective is to discern the optimum array design for enhanced PV power system efficiency. Four different PV arrays were used according to the number and orientation of PV: double portrait (2P), triple portrait (3P), double landscape (2L), and triple landscape (3L). The levels and factors selected in the simulations are listed in Table 1.

Table 1. Factors and levels used in the simulations (Simülasyonlarda kullanılan faktörler ve seviyeler)

Parameters	Levels			
	1	2	3	4
Array Size	2P	3P	2L	3L
PV Type	Monofacial	Bifacial		

As seen in Table 2, a total of eight PV power systems were designed and simulated using PVsyst software. Pitch distance was calculated for four different array designs. Each system was configured with an installed power capacity of 500 kW, while keeping other parameters constant. The simulations were carried out in Karapınar, Türkiye, leveraging meteorological data obtained from PVGIS. Meteorological data in the coordinates are given in Table 3.

Table 2. L8(4¹ 2⁴) array: Taguchi design utilized in this study. dizisi: (L8(4¹ 2⁴) bu çalışmada kullanılan Taguchi tasarımı)

Design	Array Size	PV Type
Design-1	2P	Monofacial
Design-2	2P	Bifacial
Design-3	3P	Monofacial
Design-4	3P	Bifacial
Design-5	2L	Monofacial
Design-6	2L	Bifacial
Design-7	3L	Monofacial
Design-8	3L	Bifacial

Table 3. Monthly data of coordinates selected for installation [26] (Kurulum için seçilen koordinatların aylık verileri)

	Global horizontal irradiation (kWh/m ²)	Horizontal diffuse irradiation (kWh/m ²)	Temperature (°C)	Wind velocity (m/s)	Relative humidity (%)
January	56.8	27.4	1.2	3.41	79.1
February	103.8	37.7	5.2	1.90	70.2
March	127.1	58.2	8.1	3.42	69.6
April	174.3	64.8	12.0	2.61	67.8
May	217.5	75.1	20.0	2.88	46.1
June	241.7	62.1	24.9	3.04	42.2
July	253.4	58.9	27.7	3.14	36.9
August	228.8	55.6	24.9	3.90	39.0
September	175.0	48.1	24.3	2.17	41.8
October	133.4	40.9	12.4	2.95	58.7
November	81.2	30.4	3.3	2.36	65.6
December	62.1	27.1	1.6	2.52	82.2
Year	1855.0	586.2	13.8	2.9	58.3

The spatial arrangement of the shed is predominantly defined by three key parameters: PV array width (W), pitch (Pitch), and tilt angle (α), as illustrated in Figure 1. In this context, the shading

limit angle (β) is identified as the angle at which a shadow initiates on the adjacent shed, as depicted in Figure 1.

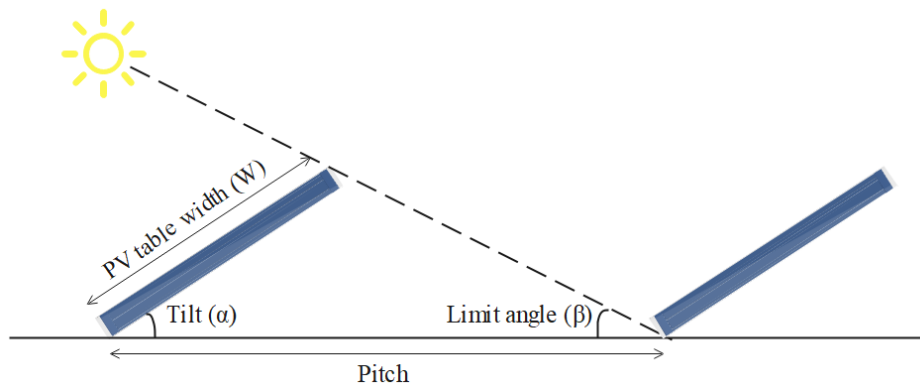


Figure 1. Sheds scheme (Işınım Şeması)

It is noteworthy that no universally optimal value exists for this angle. However, conventionally, the worst-case scenario (December 21) is considered to minimize mutual shadings. To ensure the absence of shading on the solar panel plane, the pitch is calculated using Equation (1) for a specified shading limit angle [28].

$$\text{Pitch} = W(\cos\alpha + \sin\alpha / \tan\beta) \tag{1}$$

Pitch distance was calculated for four different array designs. Each system was configured with an installed power capacity of 500 kW, while keeping other parameters constant. Array width and pitch distances for each design are calculated and given in Table 4. These values were used in the simulation.

Table 4. Array width and pitch distances for each design (Her tasarım için dizi aralığı ve adım mesafeleri)

Design	Array Width, W (m)	Pitch (m)
Design-1	4.39	8.47
Design-2	4.39	8.47
Design-3	6.6	12.74
Design-4	6.6	12.74
Design-5	2.22	4.28
Design-6	2.22	4.28
Design-7	3.35	6.46
Design-8	3.35	6.46

A critical consideration in the design of a photovoltaic (PV) system is the ground cover ratio (GCR), denoting the proportion of the modules' sensitive area to the total ground area occupied by the PV system. Notably, the "real" ground cover ratio can alternatively be expressed as the ratio of width to pitch. This presentation aligns with the design of the PV system, as it is based on shed parameters rather than the initial available area. This approach is deemed more pertinent as it incorporates shed characteristics, ensuring a more accurate representation of the actual ground cover ratio in the PV system design [28].

The disposition of solar panels was investigated considering two distinct arrangements: portrait and landscape orientations. It is imperative to underscore the significance of shading in optimizing a photovoltaic (PV) array, given that the beam component impacts the electrical shading dynamics within the system. Consequently, this study conducted numerous simulations, systematically varying the width of the PV array for two different PV types under fixed tilt ($\alpha=37^\circ$), fixed limit angle ($\beta=28^\circ$), and fixed azimuth angle (0°) conditions. This approach facilitated a

comprehensive understanding of the shading effects on each case independently.

The determination of the optimal tilt for maximizing energy production typically assumes alignment with the site latitude [29]. In the context of fixed-tilt systems, the annual energy yield and Performance Ratio (PR) are markedly influenced by both the pitch and plane tilt. These factors are pivotal in shaping incident irradiation and shading patterns within the collector plane. It is essential to note that PR, denoting the ratio of effectively produced energy to the energy generated under nominal efficiency conditions (Standard Test Conditions, STC), is highly contingent on both pitch and plane tilt configurations.

3.1. PV and inverter selection (PV ve invertör seçimi)

To conduct a comparative analysis, monofacial and bifacial modules with commensurate specifications were meticulously chosen, with preference given to Trina Solar as the brand. The pertinent characteristics of the selected modules are presented in Table 5.

Tablo 5. Technical specifications of monofacial and bifacial PV modules used in the study (Çalışmada kullanılan tek yüzeyli ve çiftyüzeyli PV modüllerin teknik özellikleri)

	Monofacial	Bifacial
Brand	Trina Solar	Trina Solar
Model	TSM-DE18M-(II)-500	TSM-DEG18MC-20-(II)-500 Bifacial
Nominal power	500 Wp	500 Wp
Cell	75x2	75x2
Length	2176 mm	2256 mm
Width	1098 mm	1133 mm
Thickness	35 mm	30 mm
Weight	26.3 kg	32.3 kg
Module area	2,389 m ²	2.556 m ²
Short circuit current (I_{sc})	12.28 A	13.92 A
Open circuit voltage (V_{oc})	51.7 V	50.3 V
Maximum power point current (I_{mpp})	11.69 A	13.04 A
Maximum power point voltage (V_{mpp})	42.8 V	41.8 V
Temperature coefficient	- 0.35 %/°C	- 0.34 %/°C

Both panels were positioned at a standardized height of 1.5 meters above the ground. The ground albedo effect for the bifacial panel was established at 0.6, a value achievable through the application of white paint or cement [30]. Huawei Technologies, one of the important players in the solar energy

industry, was preferred in the inverter selection. Considering its suitability for the number and type of panels, the SUN2000-55KTL-H2 model, which has eight units of 55 kW AC output power and an operating voltage range of 600 to 1450 V, was deemed suitable.

Integral to the design process in PVsyst simulation is the number of modules and chains, which are pivotal parameters influencing optimal system performance. These variables are intricately interconnected and necessitate judicious selection to ensure the efficacy of the design. The number of serial modules denotes the quantity of arrays where modules are serially connected. In PVsyst, this number is determined by meticulous attention to the congruence between the operating voltage of the modules and that of the inverter. Augmenting the number of series modules has the potential to amplify power output, but it is imperative to avoid exceeding the inverter's operating voltage. Concurrently, the chain count signifies the number of parallel-connected threads. While escalating the number of chains enhances total power output, it also increases total current. Hence, careful consideration of the inverter's input current limits is crucial. Furthermore, reducing the number of threads can enhance module performance, especially in challenging conditions such as shading. In light of these considerations, the number of serial modules was established at 20, while the number of chains was set at 50.

4. OPTIMIZATION ANALYSIS (OPTİMİZASYON ANALİZİ)

The implementation of optimization analyses is pivotal for advancing the understanding of the intricate relationship between the control parameters inherent in a process and the corresponding quality parameters [30]. Within the scholarly discourse, researchers employ diverse optimization methodologies tailored to the specific objectives of their investigations. The primary objective of our study was to discern the most optimal combination of control parameters that influence quality characteristics. Accordingly, we opted for the Taguchi method, renowned for its simplicity, efficiency, and systematic approach, facilitating the derivation of results through a minimized number of trials within the shortest possible timeframe. Additionally, the contribution rates of these parameters were elucidated through the application of Analysis of Variance (ANOVA) [31],[32].

4.1. Taguchi method (Taguchi yöntemi)

The Taguchi method stands as a widely employed statistical approach for optimizing factors influencing the performance characteristics of a given process or system. This method effectively yields results from minimal trials, thereby delineating the significance and hierarchy of control

parameters. Moreover, it identifies the most influential parameter and determines the optimal level for each parameter within the system. Notably, the Taguchi method tests combination pairs rather than exhaustively testing all potential combinations. Over the past two decades, it has found widespread application across various engineering disciplines and beyond [33],[34].

The Taguchi method comprises vital components such as an orthogonal array, signal-to-noise ratio (S/N or SNR), response table, and response graph, also known as Main Effect Analysis (MEA). The highest SNR value for each parameter indicates the optimal level for that parameter, while the highest primary impact value signifies the parameter's most significant influence on system performance. Subsequently, a Mean Effective Plot (response graph) for SNRs is generated using the optimum control factors derived from the response table, allowing for an in-depth analysis of the impact of control factors on performance [35],[36].

The analysis of SNR incorporates three distinct performance characteristics: larger-is-better, nominal-is-better, and smaller-is-better. In this context, the preference was given to 'larger-is-better' performance characteristics, and Equation (2) was utilized to calculate SNR values, facilitating a comprehensive assessment of the system's performance [31],[34],[35],[36].

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

4.2. Analysis of variance (ANOVA) (Varyans analizi)

The Analysis of Variance (ANOVA), a statistical method, serves as a decision-making tool utilized to discern the proportional contribution of each parameter to the overall performance of a system. It is instrumental in determining the significance of each parameter's impact on the response, thereby validating the outcomes derived from the Taguchi method [31],[32].

Within the scope of this study, the ANOVA method is employed to elucidate the influence of each parameter on the uniformity of annual energy output delivered to the grid (E-Grid), Performance Ratio (PR), and the saved CO₂ emissions. The statistical significance level is set at 0.05, corresponding to a 95% confidence level. Equations (3), (4), (5), (6), and (7) are utilized to derive critical indicators of the ANOVA method, including the sum of squares (SS), contribution ratio (CR), degrees of freedom

(DOF), mean of squares (MS), and F-values for each factor. This comprehensive analysis aids in comprehending the individual and collective impacts of the parameters on the system's performance [31]-[38].

$$SS_i = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{3}$$

Where, \hat{y}_i is the i-th response value, \bar{y} is the mean response value.

The contribution ratio (CR) is defined as the ratio of the sum of squared deviations to the total sum of squared deviations Eq. (4).

$$CR_i = \frac{SS_i}{SS_T} \tag{4}$$

The corresponding degrees of freedom are as follows Eq. (5):

$$DOF_T = \sum_{i=1}^{n_f} (L_i - 1) + DOF_{error} \tag{5}$$

The corresponding mean of squares are as follows Eq. (6):

$$MS_i = \frac{SS_i}{DOF_i} \tag{6}$$

The F-factor, which reflects the statistical reliability of the results, is given by the ratio of the parameter's mean square to the mean square error Eq. (7).

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_{error}} \tag{7}$$

5. RESULTS (BULGULAR)

Based on the outcomes generated by PVsyst, the application of the Taguchi method involves the establishment of a pertinent model through rigorous statistical analysis. The primary aim of this method is to discern the optimal values for the array in photovoltaic (PV) systems. The simulation design, as depicted in Table 6, is formulated using Signal-to-Noise (S/N) ratios derived from the Taguchi method. Each row in this design encapsulates a distinct combination of various parameter levels. The control parameters are systematically allocated to the columns, and the output responses, along with their corresponding S/N ratio values, are computed and likewise assigned to the columns. This systematic representation facilitates a comprehensive analysis of the relationships between control parameters and system responses in PV systems.

Table 6. Simulation design with SN ratio (SN oranlı simülasyon tasarımı)

Design	Array Size	PV Type	E-Grid (MWh)	PR	Saved CO ₂ Emissions (tons)	S/N Ratios
Design-1	2P	Monofacial	841.44	0.793	9818.806	2.7567
Design-2	2P	Bifacial	856.43	0.808	10009.61	2.9194
Design-3	3P	Monofacial	854.04	0.805	9979.271	2.8871
Design-4	3P	Bifacial	869.11	0.82	10177.427	3.0475
Design-5	2L	Monofacial	839.96	0.792	9799.972	2.7457
Design-6	2L	Bifacial	855.28	0.807	9994.947	2.9087
Design-7	3L	Monofacial	847.37	0.799	9894.26	2.8221
Design-8	3L	Bifacial	862.81	0.814	10090.869	2.9837

Given that the primary objective of the current investigation is to maximize E-Grid, PR, and Saved CO₂ Emissions, the "Larger the better" criterion is adopted. Consequently, the Signal-to-Noise (S/N) ratio is computed for the response variable, wherein a higher value indicates superior performance.

The response table in Table 4 delineates the S/N ratio for various levels of the critical factors under consideration. Adhering to the principles of the Taguchi method, the optimum S/N ratio is observed at the second level of Array Size and PV type, as detailed in Table 7 and visually represented in Figure 2. Consequently, the highest values for E-Grid (869.11 MWh), PR (0.82), and Saved CO₂

emissions (10177.427 tons) were realized in Design-4. This outcome signifies the optimal configuration that aligns with the goal of maximizing the specified performance metrics.

Table 7. Response table for means (Yanıt tablosu)

Level	Array Size	PV Type
1	3588	3573
2	3647	3643
3	3582	
4	3616	
Delta	65	70
Rank	2	1

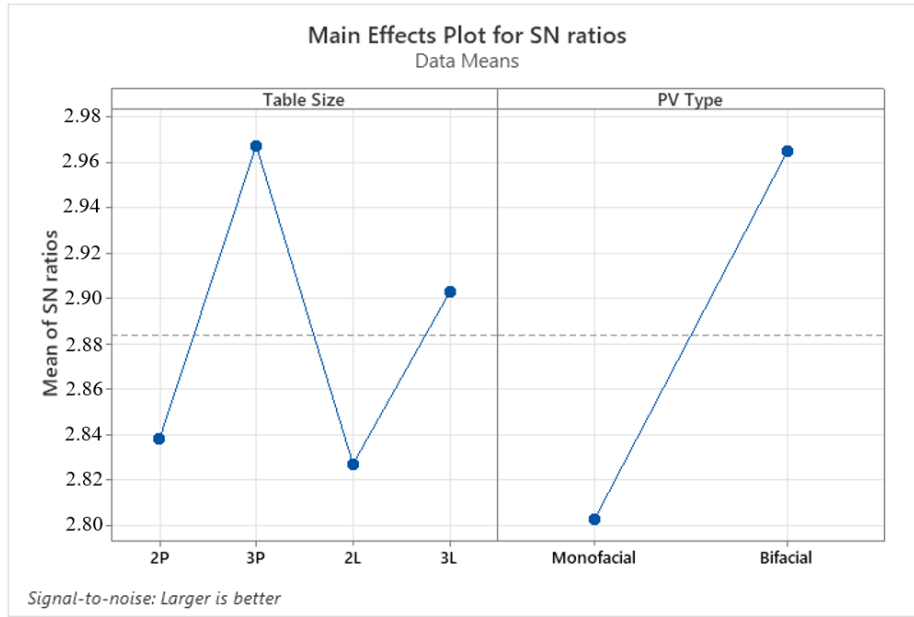


Figure 2. Main effects plot for SN ratios (SN oranları için etki grafiği)

As a statistical methodology, the analysis of variance (ANOVA) furnishes a comprehensive framework for examining the outcomes associated with the response variable, as delineated in Table 6. This analytical endeavor showcases meticulous precision, underscored by a substantial R-squared value of 99.93% and an adjusted R-square value of 99.98%. These metrics not only attest to the efficacy of the chosen model but also signify its robust fitting to the observed data, thereby reflecting a commendable degree of model accuracy.

Moreover, the values enlisted in Table 8 assume heightened statistical significance, with a pivotal

emphasis on maximizing F-values and minimizing P-values, precisely attaining a threshold below 0.005. This nuanced criterion substantiates the steadfastness of the statistical inferences derived from the ANOVA analysis, affirming the appropriateness and reliability of the selected model in elucidating the variability observed in the response variable. In essence, the ANOVA results provide a nuanced understanding of the statistical relationships inherent in the examined data, fortifying the robustness and credibility of the analytical findings.

Table 8. Analysis of variance (Varyans analizi)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Array Size	3	245.990	34.72%	245.990	81.997	3701.89	0.0000075
PV Type	1	462.384	65.27%	462.384	462.384	20875.13	0.0000007
Error	3	0.066	0.01%	0.066	0.022		
Total	7	708.441	100.00%				

Figure 3 depicts the residual plots corresponding to distinct parameters under investigation. The residual plot against predicted values manifests a stochastic distribution of the dispersed points, while the residual plot against run number exhibits an absence of discernible patterns. Additionally, the normal probability plot aligns consistently along the linear axis. Moreover, the residual errors concerning fits and order are quantified at 0.117,

indicative of the precision of the model and thereby affirming its appropriateness. The contribution of the PV array size parameter is elucidated at 34.72%, with the PV type parameter exhibiting a substantial contribution of 65.27% to the observed variability in E-Grid. This underscores the notable influence of these parameters on the response variable. In summary, the residual analyses, precision metrics, and parameter contributions collectively underscore

the efficacy and accuracy of the model in elucidating the intricate relationships between the considered factors and the response variable. These

findings substantiate the model's suitability and its capacity to accurately represent the simulation runs of the response variables.

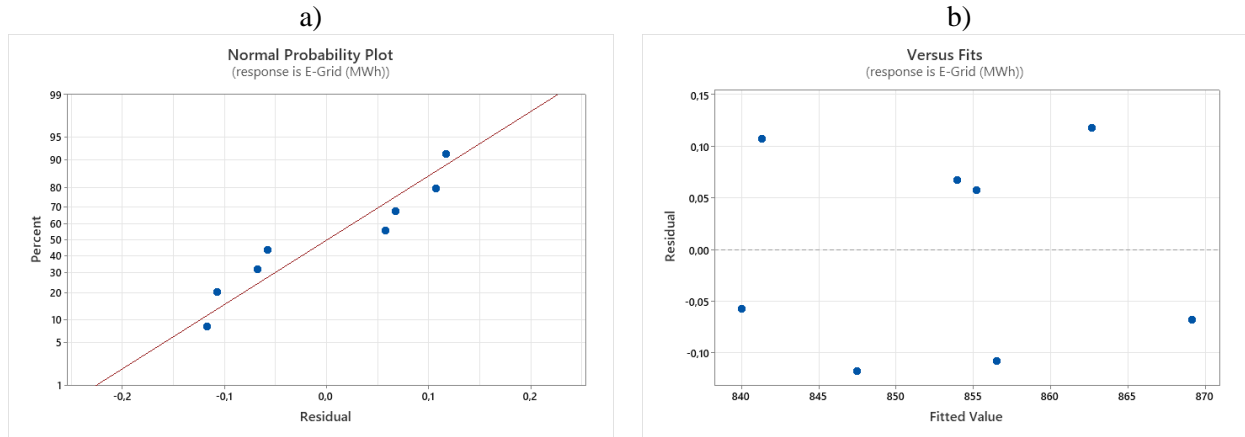


Figure 3. Residual figures for E-Grid a) normal probability plot, b) residual versus predicted (E-Şebeke için artık rakamlar a) normal olasılık grafiği, b) artık ve tahmin edilenler)

Figure 4 illustrates the E-Grid and saved CO₂ emissions values for each design configuration. The maximum E-Grid value, quantified at 869.11 MWh, was attained in Design-4 (3P-Bifacial), while the minimum E-Grid value, amounting to 839.96 MWh, was recorded in Design-5 (2L-Monofacial). Likewise, the highest saved CO₂ emissions were computed in Design-4, totaling 10177.427 tons,

while the lowest saved CO₂ emissions, amounting to 9799.972 tons, were observed in Design-5. Furthermore, an evident positive correlation is discernible between the E-Grid and saved CO₂ emissions outputs. This observation implies that variations in E-Grid values coincide with consistent trends in saved CO₂ emissions across the diverse design configurations.

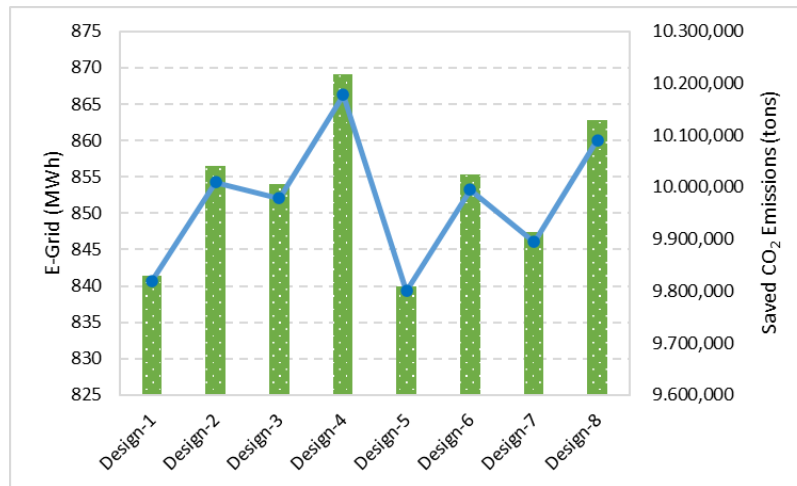


Figure 4. E-Grid and saved CO₂ emissions values for designs (Tasarımlar için E-Grid ve tasarruf edilen CO₂ emisyon değerleri)

Figure 5 displays the performance ratio (PR) values for all designs. The highest PR, calculated at 0.82, is observed in Design-4 (3P-Bifacial), while the lowest PR, computed at 0.792, is found in Design-5 (2L-Monofacial). Additionally, it is evident that the PR values exhibit a positive correlation with the

outputs of E-Grid and saved CO₂ emissions. This observation suggests that variations in PR values align consistently with trends in both E-Grid and saved CO₂ emissions across the entire spectrum of design configurations.

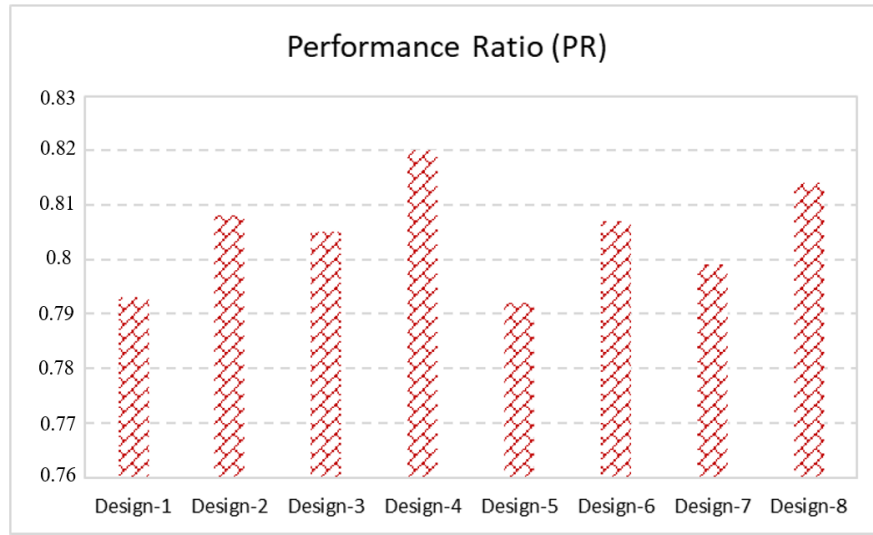


Figure 5. Performance ratio (PR) values for designs (Tasarımlara ilişkin performans oranı (PR) değerleri)

Previous research explored the performance rates of diverse PV array panel designs through simulation studies. Literature reviews have documented performance rates for various PV array designs, as

outlined in Table 9. It is evident that the outcomes of our study align with those reported in existing literature.

Table 9. Comparison of the performance ratio results of this study with the literature (Bu çalışmanın performans oranı sonuçlarının literatürle karşılaştırılması)

Reference	Location	Average final yield (kWh/kWp/day)	Rated Capacity (kWp)	Performance ratio (%)
Present study	Konya, Türkiye	23,8	500	82
Emziane and Ali [39]	Abu Dhabi	5.1	111.4	80
Sharma and Chandel [40]	Khatar-Kalan, India	2.23	190	74
Anang et al. [41]	Terengganu, Malaysia	3.78	7.8	71
Okello et al. [42]	Eastern Cape, South Africa	4.9	3.2	84

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In conclusion, the optimization of array design in photovoltaic power plants, as explored through the Taguchi and ANOVA analyses, has yielded valuable insights into the factors influencing the performance of these systems. The comprehensive utilization of these statistical methodologies has allowed for a nuanced understanding of the interplay between critical parameters, such as Array Size and PV Type, and the performance metrics, including E-Grid, saved CO₂ emissions, and Performance Ratio (PR).

impacts of Array Size and PV Type on the E-Grid. The precise model, with low residual errors and well-distributed plots, affirms conclusion reliability. ANOVA analysis validated statistical significance, providing a robust framework for assessing individual parameter contributions.

- The Taguchi method efficiently optimized design configurations, emphasizing the significant

- Notably, the positive correlation observed between PR values and the outputs of E-Grid and saved CO₂ emissions further highlights the interconnectedness of these performance metrics. This insight is crucial for designing photovoltaic power plants that maximize energy production and contribute to environmental sustainability.

• Consequently, the highest values for E-Grid (869.11 MWh), PR (0.82), and Saved CO₂ emissions (10177.427 tons) were realized in Design-4 (3P-Bifacial).

• The highest PR, calculated at 0.82, is observed in Design-4, while the lowest PR, computed at 0.792, is found in Design-5 (2L-Monofacial).

• The highest saved CO₂ emissions were computed in Design-4, totaling 10177.427 tons, while the lowest saved CO₂ emissions, amounting to 9799.972 tons, were observed in Design-5.

In summary, the combined application of the Taguchi and ANOVA analyses has empowered the optimization of array design in photovoltaic power plants, offering a systematic approach to achieving enhanced performance. The findings of this study contribute valuable knowledge to the field of renewable energy system design and underscore the importance of array design in maximizing the efficiency and sustainability of photovoltaic power plants.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

If the study was supported by a research institution or fund, the name of the supporting institution/organization and the project number should be written. / Çalışma araştırma kurumu veya fonu tarafından desteklenmiş ise destek sağlayan kurum/kuruluş adı ve proje numarası yazılmalıdır.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Oğuz Kaan ÇİNİCİ: He made the design and simulations, analyzed the results and wrote the article.

Tasarım ve simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Adem ACIR: He analyzed the simulation results and checked the article.

Simülasyon sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin kontrolünü 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] Tedeschi, M., Foglia, M., Bouri, E., and Dai, P., "How does climate policy uncertainty affect financial markets? Evidence from Europe" *Economics Letters*, vol. 234, p. 111443, 2023.
- [2] Mahmood, N. S., Ajmi, A. A., Sarip, S., Kaidi, H. M., Suhot, M. A., Jamaludin, K. R., and Talib, H. H. A., "Modeling energy management sustainability: Smart integrated framework for future trends," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8027-8045, 2022.
- [3] Crespi, E., Colbertaldo, P., Guandalini, G., and Campanari, S., "Design of hybrid power-to-power systems for continuous clean PV-based energy supply," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no.26, pp. 13691-13708, 2021.
- [4] Mehmood, A., Ren, J., and Zhang, L., "Achieving energy sustainability by using solar PV: System modelling and comprehensive techno-economic-environmental analysis," *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101126, 2023.
- [5] Liu, D., Kang, Y., Ji, X., Zhang, X., and Wu, Y., "Bi-objective Pareto optimization for clustering-based hierarchical power control in a large-scale PV power plant," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103283, 2023.
- [6] Veríssimo, P. H. A., Campos, R. A., Guarnieri, M. V., Veríssimo, J. P. A., Do Nascimento, L. R., and Rüther, R., "Area and LCOE Considerations in Utility-scale, Single-axis Tracking PV Power Plant Topology Optimization." *Solar Energy*, vol. 211, pp. 433-445, 2020.
- [7] Safarzadeh Ravajiri, E., Jalali, A., and Houshfar, E., "Multi-objective Optimization and 4E Analysis of an Integrated System Based on Waste-to-energy, Solar PV, Power-to-gas, and HDH-RO Desalination." *Energy Conversion and Management*, vol. 277, p. 116677, 2023.
- [8] Mateo Romero, H. F., Hernández-Callejo, L., González Rebollo, M. Á., Cardeñoso-Payo, V., Alonso Gómez, V., Morales Aragonés, J. I., and Moyo, R. T., "Optimized Estimator of the Output Power of PV Cells Using EL Images and I-V Curves." *Solar Energy*, vol. 265, p. 112089, 2023.
- [9] Cox, J. L., Hamilton, W. T., and Newman, A. M., "Parametric Analysis on Optimized Design

- of Hybrid Solar Power Plants." *Solar Energy*, vol. 252, pp. 195-217, 2023.
- [10] Hu, S., Wu, Z., Li, S., Xu, B., Wu, J., and Liu, W., "Research on Dust Deposition of PV Modules Based on Three-dimensional Numerical Simulation and Its Application in Installation Parameter Optimization." *Journal of Cleaner Production*, vol. 423, p. 138743, 2023.
- [11] Kowsar, A., Hassan, M., Rana, M. T., Haque, N., Faruque, M. H., Ahsan, S., and Alam, F., "Optimization and Techno-economic Assessment of 50 MW Floating Solar Power Plant on Hakaluki Marsh Land in Bangladesh." *Renewable Energy*, vol. 216, p. 119077, 2023.
- [12] Tashtoush, B., Alalul, K., and Najjar, K. "Designing Sustainable Living: Optimizing on/Off-Grid PV Systems for Carbon-Reduced Residential Buildings in Jordan." *Energy and Buildings*, vol. 297, p. 113441, 2023.
- [13] Irshad, A. S., Ludin, G. A., Masrur, H., Ahmadi, M., Yona, A., Mikhaylov, A., Krishnan, N., and Senjyu, T., "Optimization of Grid-photovoltaic and Battery Hybrid System with Most Technically Efficient PV Technology After the Performance Analysis." *Renewable Energy*, vol. 207, pp. 714-730, 2023.
- [14] Ihaddadene, R., Jed, M. E. H., and Ihaddadene, N., "Assessing the Effectiveness of a PV Power Plant and Its Subfields in Algeria: Case Study Tamanrasset." *Energy for Sustainable Development*, vol. 77, p. 101348, 2023.
- [15] Ashok Kumar L., Indragandhi V., and Uma Maheswari Y., "PVSYST." *Software Tools for the Simulation of Electrical Systems*, Academic Press, ch. 9, pp. 349-392, 2020.
- [16] Çinici, O. K., Canlı, M. E., Çakıroğlu, R., and Acir, A., "Optimization of Melting Time of Solar Thermal Energy Storage Unit Containing Spring Type Heat Transfer Enhancer by Taguchi Based Grey Relational Analysis." *Journal of Energy Storage*, vol. 47, p. 103671, 2022.
- [17] Qasim, A., Nisar, S., Shah, A., Khalid, M. S., and Sheikh, M. A., "Optimization of Process Parameters for Machining of AISI-1045 Steel Using Taguchi Design and ANOVA." *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 59, pp. 36-51, 2015.
- [18] Çakıroğlu, Ramazan, and Adem Acir., "Optimization of Cutting Parameters on Drill Bit Temperature in Drilling by Taguchi Method." *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3525-3531, 2013.
- [19] Sahoo, S., Dalei, R. K., Rath, S. K., and Sahu, U. K., "Selection of PSO Parameters Based on Taguchi Design-ANOVA- ANN Methodology for Missile Gliding Trajectory Optimization." *Cognitive Robotics*, vol. 3, pp. 158-172, 2022.
- [20] Acir, A., Canlı, M. E., Ata, İ., and Çakıroğlu, R., "Parametric Optimization of Energy and Exergy Analyses of a Novel Solar Air Heater with Grey Relational Analysis." *Applied Thermal Engineering*, vol. 122, pp. 330-338, 2017.
- [21] Hong, Y., Beltran, A. A., and Paglinawan, A. C., "A Robust Design of Maximum Power Point Tracking Using Taguchi Method for Stand-alone PV System." *Applied Energy*, vol. 211, pp. 50-63, 2018.
- [22] Çinici, O. K., Karaca, B., and Acir, A., "Comparison Study in Terms of The Results of Photovoltaic Solar Energy Systems Designed with PVsyst and MATLAB Simulink Software." *Politeknik Dergisi*, vol. 26, no. 4, pp. 1635-1649, 2023.
- [23] Kazemian, A., Parcheforosh, A., Salari, A., and Ma, T., "Optimization of a Novel Photovoltaic Thermal Module in Series with a Solar Collector Using Taguchi Based Grey Relational Analysis." *Solar Energy*, vol. 215, pp. 492-507, 2021.
- [24] Bayyığıt, A., Çinici, O. K., and Acir, A., "Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaiik panellerin performans analizi." *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 407-420, 2023.
- [25] T. Khatib, A. Mohamed, and K. Sopian, "A software tool for optimal sizing of PV systems in Malaysia," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 1, p. 969248, 2012.
- [26] "PVsyst – Logiciel Photovoltaïque." <https://www.pvsyst.com/> (accessed Nov. 29, 2023).
- [27] "Photovoltaic Geographical Information System." https://www.pvsyst.com/help/meteo_source_pvgis.htm/ (accessed Nov. 29, 2023).
- [28] Silva, Miguel, Rui Castro, and Mário Batalha., "Technical and Economic Optimal Solutions for Utility-Scale Solar Photovoltaic Parks." *Electronics*, vol. 9, no. 3, p. 400, 2020.
- [29] Prasad M. and Prasad R., "Bifacial vs monofacial grid-connected solar photovoltaic for small islands: A case study of Fiji." *Renew Energy*, vol. 203, pp. 686–702, 2023.
- [30] Fan, W., Kokogiannakis, G., and Ma, Z., "A Multi-objective Design Optimisation Strategy for Hybrid Photovoltaic Thermal Collector (PVT)-solar Air Heater (SAH) Systems with Fins." *Solar Energy*, vol. 163, pp. 315-328, 2018.
- [31] Omidı, B., Rahbar, N., Kargarsharifabad, H., and Poolaei Moziraji, Z., "Performance Evaluation of a Solar Desalination-hot Water System Using Heat Pipe Vacuum Tube Parabolic Trough Solar Collector – An Experimental Study with Taguchi Analysis." *Energy Conversion and Management*, vol. 292, p. 117347, 2023.

- [32] Xie, B., Peng, Q., E, J., Tu, Y., Wei, J., Tang, S., Song, Y., and Fu, G., "Effects of CO addition and multi-factors optimization on hydrogen/air combustion characteristics and thermal performance based on grey relational analysis." *Energy*, vol. 255, p. 124573, 2022.
- [33] Ata İ. and Acır A, "Hava akışkanlı güneş kollektöründe ısı transferi iyileştirmesine etki eden parametrelerin taguchi metodu ile optimizasyonu." *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 2, pp. 527-535, 2020.
- [34] Xie, B., Peng, Q., E, J., Tu, Y., Wei, J., Tang, S., Song, Y., and Fu, G., "Numerical Investigation on Thermal Performance Improvement of Hydrogen-fueled Tube with Rib/Fins for Micro Thermophotovoltaic." *Applied Thermal Engineering*, vol. 233, p. 121107, 2023.
- [35] Zhao, S., Wei, Y., Yu, P., Nie, Y., Hu, R., He, W., Zhu, N., Li, Y., Ji, D., and Guo, K., "High Throughput Millifluidics Mixer with Double Triangle Baffle for Improvement of Mixing Performance and Reduction of Flow Resistance Designed by Grey Relational Analysis." *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 181, p. 109166, 2022.
- [36] Tang, X., Wan, W., Zhang, Z., Gao, W., and Wang, Y., "Residual Deformation of Coal Gangue Subgrade Filler under Multi-vibration Cyclic Loading." *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, pp. 1-15, 2023.
- [37] Gao, F., Tian, L., Meng, F., Xia, Y., Shi, C., Zhang, Z., Cui, Y., Liu, S., and Li, J., "A Novel Dynamic Model and Simulations on Abnormal Wear of a Space Shaft Cage Worked at Low Temperature Environment." *Tribology International*, vol. 189, p. 108952, 2023.
- [38] Tanürün H.E., "Improvement of vertical axis wind turbine performance by using the optimized adaptive flap by the Taguchi method." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46. No. 1, pp. 71-90, 2023.
- [39] Emziane, M., and Al Ali, M, "Performance assessment of rooftop PV systems in Abu Dhabi." *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 101-105, 2015.
- [40] Sharma, V., and Chandel, S. "Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India." *Energy*, vol. 55, pp. 476-485, 2013.
- [41] Anang, N., Syd Nur Azman, S., Muda, W., Dagang, A., and Daud, M. Z, "Performance analysis of a grid-connected rooftop solar PV system in Kuala Terengganu, Malaysia." *Energy and Buildings*, vol. 248, p.111182, 2021.
- [42] Okello, D., Van Dyk, E., and Vorster, F. "Analysis of measured and simulated performance data of a 3.2 kWp grid-connected PV system in Port Elizabeth, South Africa." *Energy Conversion and Management*, vol. 100, pp. 10-15, 2015.

Elektrikli Ev Aletlerinde Müdahalesiz Yük İzleme, Sınıflandırma ve Kontrolünün Gerçekleştirilmesi

Fethi Batıncan Gürbüz^{1*} , Ramazan Bayındır^{1*} , Seyfettin Vadi^{1*} 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/Ankara

Article Info

Research article
Received: 22/09/2023
Revision: 06/12/2023
Accepted: 07/12/2023

Keywords

Non-intrusive Load
Monitoring
KNN
SVM
Event Detection of Smart
Grids

Makale Bilgisi

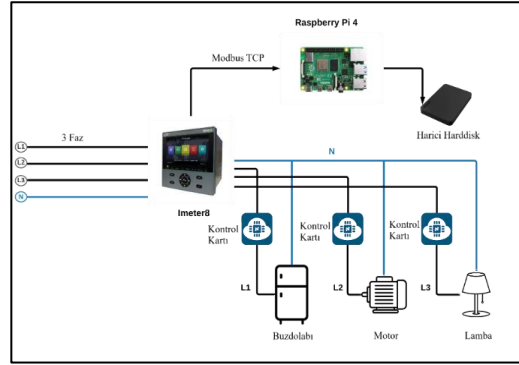
Araştırma makalesi
Başvuru: 22/09/2023
Düzeltilme: 06/12/2023
Kabul: 07/12/2023

Anahtar Kelimeler

Müdahalesiz Yük İzleme
KNN
SVM
Akıllı Şebekelerin Olay
Tespiti

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada elektrikli ev aletlerinin tespiti, müdahalesiz yük izleme yöntemiyle birlikte makine öğrenme algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. / This study employs machine learning algorithms in combination with non-intrusive load monitoring methods to detect electrical household appliances.



Şekil A: Çalışmanın Genel Yapısı / Figure A: General Structure of the Study

Highlights (Önemli noktalar)

- Makine Öğrenme Yöntemleri / Machine Learning Methods
- Müdahalesiz Yük İzleme / Non-intrusive Load Monitoring
- Kontrol Kartları ile Senaryo Çalışmaları / Scenario Studies with Control Cards
- Veri Toplama / Data Collection

Amaç (Aim): Bu çalışma ile birlikte yüksek doğrulukta verilerin tespiti müdahalesiz yük izleme yöntemiyle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Amaç doğrultusunda oluşturulan veri toplama aşaması ve makine öğrenme algoritmalarıyla tespitler yapılmıştır. / This study employs machine learning algorithms in combination with non-intrusive load monitoring methods to detect electrical household appliances.

Özgünlük (Originality): Yapılan çalışmada hibrit bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma ile literatürdeki makaleler karşılaştırılmış ve sonucunun daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca veri toplama aşamasında oluşturulan kontrol kartlarıyla ile çalışmalara yeni bir bakış açısı getirilmiştir. / This study proposes a hybrid algorithm that was compared to existing literature, demonstrating superior results. Additionally, the study introduces a new perspective through the use of control cards during the data collection phase.

Bulgular (Results): Literatürdeki yayınlarda kullanılan tek çeşit algoritma yerine hibrit algoritmaların kullanılmasıyla daha yüksek doğrulukta tespitler yapılabildiği görülmektedir. Kontrol Kartları ile senaryoların oluşturulması literatürdeki zorlukların önüne geçmektedir. / Hybrid algorithms have been shown to achieve higher accuracy detections compared to single algorithms used in literature publications. To avoid the difficulties encountered in literature, scenarios with Control Cards can be created.

Sonuç (Conclusion): Çalışma sonucunda, hibrit algoritmaların daha kesin, yüksek doğrulukta tespitler yapılabilmesi için gösterilmiştir. Literatürden örnekler verilerek karşılaştırılmalar yapılmış ve diğer algoritmalarından farkı belirtmiştir. / The study demonstrates that hybrid algorithms produce more precise and accurate detections. This is supported by examples from the literature and the distinction from other algorithms.



Elektrikli Ev Aletlerinde Müdahalesiz Yük İzleme, Sınıflandırma ve Kontrolünün Gerçekleştirilmesi

Fethi Batıncan Gürbüz^{1*} , Ramazan Bayındır^{1*} , Seyfettin Vadi^{1*}

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/09/2023
Düzeltilme: 06/12/2023
Kabul: 07/12/2023

Anahtar Kelimeler

Müdahalesiz Yük İzleme
KNN
SVM
Akıllı Şebekelerin Olay Tespiti

Öz

Son yıllarda giderek büyüyen enerji ihtiyacı, araştırmacıları enerji yönetimi ve akıllı şebekeler gibi alanlara yöneltmiştir. Özellikle, şebekeye bağlı yüklerin analizleri ve izlenmesi gün geçtikçe daha da önem kazanmıştır. Bu ihtiyaç, müdahalesiz yük izleme (MYİ) yönteminin ortaya çıkmasına yol açmıştır. MYİ, elektrikli cihazların şebeke üzerinden izlenmesini ve tespit edilmesini, özelliklerine göre kategorize edilmesini amaçlamaktadır. Bu sistemler, şebekeye bağlı cihazların tek bir noktadan izlenerek güç kullanımının takip edilebilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, deneysel ortamda toplanan verilerle müdahalesiz yük izleme yöntemine uygun yazılım ve donanımlar oluşturulmaktadır. Ayrıca, toplanan veri setleri üzerinde yapılan çalışmalarla bir hibrit algoritma önerilmektedir. Böylece, elde edilen verilerin doğruluğu ve algoritmanın etkinliği daha iyi anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen cihaz kontrol üniteleri, yüklerin belirli senaryolarda otomatik olarak etkinleştirilmesi veya devre dışı bırakılmasını sağlayarak, yeni bir perspektif sunmaktadır. Bu sayede, enerji yönetimine daha esnek ve etkili bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışma, enerji yönetim sistemleri ve akıllı şebekelerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Enerji ihtiyacının artmasıyla ortaya çıkan zorluklara çözümler sunarak enerji verimliliğini artırmayı ve elektrik kayıplarını azaltmayı hedeflemektedir. Müdahalesiz yük izleme yöntemiyle elde edilen bulgular, enerji sektöründeki uygulamalara yönelik yeni çözümler sunmak için önemli bir adım olacaktır.

Non-intrusive Load Monitoring, Classification and Control in Electrical Home Appliances

Article Info

Research article
Received: 22/09/2023
Revision: 06/12/2023
Accepted: 07/12/2023

Keywords

Non-intrusive Load Monitoring
KNN
SVM
Event Detection of Smart Grids

Abstract

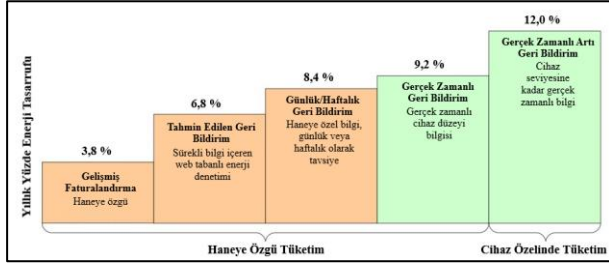
The growing energy demand in the past 15 years has directed researchers towards fields like energy management and smart grids, with a particular emphasis on analyzing and monitoring grid-connected loads. This has led to the emergence of Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) methods, which aim to track and categorize electrical appliances on the grid, contributing to more efficient energy management and reduced electrical losses. In this study, software and hardware tailored for NILM are developed using experimental data, accompanied by the proposal of a hybrid algorithm to enhance data accuracy and algorithm efficiency. The study's device control units enable automated load activation or deactivation, offering a flexible and effective approach to energy management. Ultimately, this research aims to contribute to the development of energy management systems and smart grids, addressing challenges posed by increasing energy needs and providing innovative solutions for the energy sector.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesi nedeniyle artan enerji problemleri, enerjinin verimli kullanılmasının yanında enerjinin sınıflandırılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, enerji takibi yapılarak tahminlerde bulunulması sonucunda enerji verimliliğinin artırılması, maliyetlerin azaltılmasıdır. Literatürde

yapılan çalışmalara bakıldığında, enerji verimliliği konusunda tartışmalı ve öne çıkan bir konu olan akıllı şebekeler, önemli bir odak noktası olmuştur. Akıllı şebekeler, son kullanıcıların enerji üretimine doğrudan katkı sağlayabilme özelliğiyle büyük bir avantaj sunmaktadır [1]. Mevcut şebeke yapılarında bulunan sayaçlar, Şekil 1'de görüldüğü üzere, sadece haftalık veya aylık periyotlarda genel tüketim verilerini sunarak sınırlı bilgi

sağlamaktadır. Yapılan bir araştırma, bu tür sayaçların dahi son tüketim noktalarına entegre edilmesiyle enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir [2-3].



Şekil 1. Hane ve cihazların geri bildirim grafiği

(Feedback graph of households and devices)

Şekil 1'de görülen hane ve cihazların geri bildirim grafiğinde elde edilen sonuçlar, tüketiciye belirli bir süre sonunda ödenecek toplam tutarın belirlenebilmesini sağlamaktadır. Bu tüketim verileri, sayaçlar aracılığıyla detaylı bir şekilde tüketiciye sunulmaktadır ve bu veriler doğrultusunda tüketiciye kendi önlemlerini almak için sistem tarafından fırsat verilmektedir. Tüketim verilerinin sadece son tüketicileri ilgilendirdiği düşünülebilir; ancak, enerji üreten şirketler için de bu bilgilerin elde edilmesi son derece önemlidir. Enerji üreten firmalar, bu verileri kullanarak üretim planlamalarını daha doğru ve kesin bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Akıllı şebekelerin uygulanmasıyla birlikte, son tüketiciler ve enerji üreticileri işbirliği yaparak maliyetleri ve enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahip olacaktır. Literatürdeki çalışmalar, evlerdeki elektrik enerji tüketiminin %12 oranında azaltılabileceğini göstermektedir [2-3]. Bundan dolayı akıllı şebekelerin benimsenmesi ile hem tüketici hem de enerji üreten firmalar için önemli avantajlar sunabileceği sonucuna varılmaktadır.

Akıllı şebekeler sayesinde yük-cihaz yönetim sistemleri, sayaçlar ve enerji analizörleri gibi inovasyonlar, elektrikli cihazların şebekeye entegre edilmesi ve verilerin kaydedilmesi konusunda çözümler sunmaktadır. Literatürde yapılan araştırmalar, cihaz yük izleme (CYİ) alanında müdahaleli ve müdahalesiz olmak üzere iki ana kategori olduğunu göstermektedir. Müdahaleli yük izleme, sensörlerin şebeke girişlerine ve her bir cihaza takılarak gerçek zamanlı izleme sağlayan çalışmaları içermektedir. Müdahaleli yöntem, yüksek izleme doğruluğu sağlamasıyla dikkat çeker. Bununla birlikte, müdahalesiz yük izleme (MYİ) çalışmaları, maliyet ve uygulanabilirlik

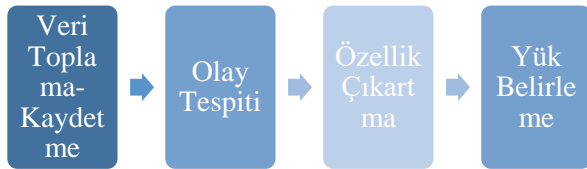
açısından önem kazanmaktadır. MYİ yöntemi, genellikle elektrik devresinin girişindeki bir sensörden alınan verilerle cihazların karakteristik özelliklerini belirlemeyi amaçlar. Bu yaklaşımın esas amacı, şebeke girişine bağlı analizör tarafından elde edilen verileri kullanarak şebekeye bağlı yükleri ayırt etmek ve bu ayrıştırılmış sinyalleri ilgili yüklerle ilişkilendirmektir. En uygun koşullarda, geliştirilen yöntemler aracılığıyla hatta bağlı cihazların elde edilmiş ana sinyalden takip edilmesi amaçlanmaktadır. Geleneksel elektrik sayaçları sadece genel enerji tüketimini ölçerken, MYİ yöntemi cihaza özgü elektriksel imzaları tanımlayarak genel elektrik sinyalini analiz ederek ve bileşenlerine ayırmaktadır. Bu şekilde, enerji tasarrufunu desteklemek ve enerji verileriyle akıllı ev uygulamalarını zenginleştirmek için daha ayrıntılı bir analiz yapmayı sağlar.

MYİ, 1985 yılında George W. Hart tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmış bir yöntemdir. Başlangıçta evler veya binalar gibi yapılar için toplam güç ölçüm cihazı olarak kullanılan MYİ yönteminin, daha sonraki çalışmalar ve teknolojik ilerlemelerle birlikte kullanıcıların tasarruf etmesine ve çevresel etkileri azaltmasına yardımcı olabileceği keşfedilmiştir. Evler veya elektrikli cihaz sistemleri gibi sistemlerde, cihazların enerji tüketimlerini belirleyebilmek için gerilim ve akım sensörlerinden oluşan cihazlarla izlenmeleri gerekmektedir. MYİ, bu sensörler aracılığıyla şebekeye bağlı cihazları algılamaya yardımcı olan bir yöntemdir. Bu sistemlerin kullanımının en önemli avantajı, geleneksel yöntemlerde olduğu gibi her bir cihaza takılan ölçüm sensörleri yerine, ölçümlerin şebeke giriş noktasından elde edilebilmesidir. Bu sayede kurulum maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir. Yapılan çalışmalar, enerji yönetimi ve gerçek zamanlı verilere dayalı olarak enerji tüketiminde önemli oranda tasarruf sağlanabileceğini ortaya koymuştur [3-7].

Son zamanlarda MYİ yöntemi için yapay zeka tekniklerinin kullanımı üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda, mevcut verilerin kullanılarak eğitim süreçleri gerçekleştirilmiştir. Bu eğitim sonucunda, cihazların sınıflandırılması hedeflenmiştir. MYİ yöntemi ile ilgili olarak makine öğrenmesi temelli birçok çalışma yapılmıştır [8]. Bu çalışmalar, cihazların tanımlanması ve olayların tespiti gibi hedeflere ulaşmada önemli bir rol oynamıştır. MYİ yöntemi,

literatürde farklı yaklaşımlarla ele alınmış ve çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlgili örnekler arasında harmonik tabanlı araştırmalar [9-10], geçici durum analizine dayalı çalışmalar [11], kararlı durum analizleri ve akım-gerilim (VI) yörünge tabanlı analizler [12] gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmaların içeriğinde, yüksek frekanslı ölçümler, karmaşık hesaplamalar gerektiren senaryolar ve çoklu değişkenler gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Yüksek maliyetler ve sınırlı veri toplama imkanları gibi faktörler, sistemlerdeki zorlukları artırmaktadır. Gerçek zamanlı verilerin işlenmesi ve sistemlere uygulanması konusunda da bazı zorluklar bulunmaktadır, bu nedenle bu çalışmalar genellikle simülasyonlarla sınırlı kalmaktadır.

MYİ çalışmasının uygulanabilmesi için yapısal ve devreye bağlanma aşamaları mevcuttur. İlk adım olarak, cihazın şebekeye entegrasyonu gerçekleştirilir ve her bir fazdaki yüklerden elektriksel veriler toplanır. Ardından, bu verilerin ne zaman ve hangi aralıklarla devreye alındığı veya devreden çıktığı, olay tespiti aşamasında belirlenir. Bu aşamadan sonra, cihazların karakteristik özelliklerine göre bir özellik çıkarma yöntemi kullanılarak yük tespiti aşamasına geçilir. MYİ algoritmasının genel yapısı, Şekil 2'de gösterildiği şekliyle sunulmaktadır.



Şekil 2. MYİ algoritma aşamaları (MYI algorithm stages)

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, yapay sinir ağlarının yük belirleme sürecinde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Roos tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel elektrik yüklerinin ayrıştırılması ve sınıflandırılması için kararlı durum analizi yöntemi kullanılmıştır [13]. Ayrıca, Srinivasan tarafından MYİ yöntemi kullanılarak harmonikler üzerinde yapay sinir ağlarıyla geliştirilen bir yöntem yayınlanmıştır [14]. Bu çalışmalardaki yöntemlerin temelinde harmoniklerin etkilerinin tam olarak analiz edilmesi ve dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır [15]. MYİ yöntemi, elektrik şebekesine bağlı olan cihazların herhangi bir anda hangilerinin aktif olduğunu ve bu cihazların toplam tüketim yüzdelerini belirlemeye yönelik bir zaman serisi

sınıflandırma problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

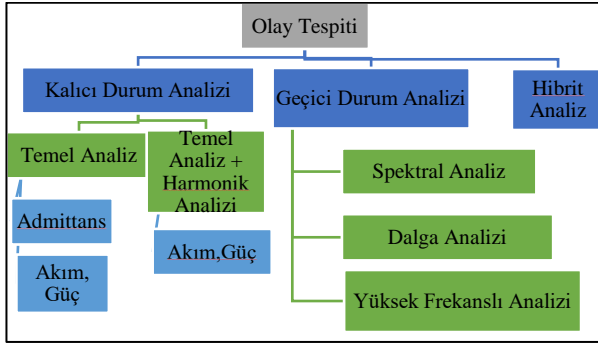
1.1. Veri Toplama (Data Collection)

Genel olarak MYİ yapısının ayrıntılı açıklamaları bu aşama olarak Şekil 2'de sunulmaktadır. Veri toplama aşamasında, MYİ yöntemiyle ilgili çalışmalarda evlerin ana giriş şebekelerine takılan sensörler vasıtasıyla cihazların verileri toplanmaktadır. Verilerin toplanma yöntemi çeşitli çalışmalarda farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, bazı çalışmalarda aktif güç ölçümü için sensörler kullanılmakta ve bunun için voltaj, akım ve güç faktörü gibi temel ölçümler yapılmaktadır [16]. Diğer bir ölçüm yaklaşımı ise görünür güç, $\cos\theta$ ve reaktif güç gibi parametreleri içermektedir. Ayrıca, elektriksel karakteristikler, elektromanyetik bozunum (EMI), harmonik bozulma [17] ve geçici olaylar gibi ölçümler de yapılabilmektedir. Elektrik sinyallerinin analizi için kullanılan çalışmalarda genellikle iki temel veri toplama yöntemi öne çıkmaktadır [18]: yüksek örnekleme ve düşük örnekleme. Yüksek örnekleme yöntemi, 50 Hz ve daha yüksek hızlarda veri toplama işlemini kapsamaktadır ve bazı tüketim verilerinin kullanılmasında gereklidir. Bununla birlikte, yüksek maliyetli sensörlerin kullanımı nedeniyle genellikle özel çalışmalarda tercih edilmektedir. Düşük örnekleme yöntemi ise, örnekleme hızının 50 Hz ve daha düşük olduğu durumları ifade etmektedir. Bu durumda genellikle dakika veya saatlik veri toplama süreleri kullanılmaktadır. Düşük örnekleme yönteminin kullanım alanı geniş olup, literatürdeki çalışmaların bu örnekleme hızında gerçekleştirildiği gözlenmektedir.

1.2. Olay Tespiti (Event Detection)

Olay tespiti, MYİ algoritmasının etkin bir şekilde çalışabilmesi için kritik bir aşamadır. Bu aşamada, şebekeye bağlı her bir cihazın anahtarlama zamanları belirlenir. Genellikle, olay tespiti aktif gücün genlik değerine dayalı olarak gerçekleştirilir. Olay tespiti konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Anderson'ın çalışmasında, olay tespitini dört gruba ayırarak analiz etmiştir: Uzman Sezgisel Modeller, Olasılık Modelleri, Şablon Eşleştirme Modelleri ve Hibrit modeller. Pencere tabanlı olay tespiti yöntemi temel alınarak geliştirilen uzman sezgisel modeller, normalize edilmiş rüzgâr enerjisi verileri üzerinde etkinlik göstermektedir ve bu algoritma George W. Hart tarafından hayata geçirilmiştir. Cihazlardan elde edilen grafiklere dayanarak, anlık

tepkiler, kalıcı ve geçici durumlar olarak tanımlanmıştır [18-19]. Olasılık modelleri, literatürde yapılan çalışmalarda, toplam güç tüketiminde değişim yaşandığı anlarda olay tespiti gerçekleştirilmektedir. Bu tür senaryolar genellikle, sistem devreye alındığında veya çıkarıldığında meydana gelen anlar olarak kabul edilir. Ancak, bazı durumlarda, devreye alma ve çıkarma işlemleri çeşitli faktörler tarafından etkilenebilmektedir. Bu tür durumlarda, sistemin devreye alındığı an ile sistemde meydana gelen bir gürültü arasındaki ayrımı yapmak gereklidir. Bu nedenle, bu tür durumları analiz etmek için bazı çalışmalar yapılmıştır [20-24]. Hibrit model çalışmalarında ise, birden fazla yöntemin eş zamanlı olarak uygulanmasıyla olay tespiti gerçekleştirilir. Afzalan'ın geliştirdiği yöntem, kümeleme yöntemi ve yapay sinir ağları tabanlı bir yaklaşım, bu çalışmada önerilmiştir [25]. Ek olarak, elektriksel ölçümler ve bu ölçümlere dair analizler, olay tespiti çalışmalarında genel olarak temel olarak kullanıldığı şekilde, Şekil 3'te gösterilmiştir.



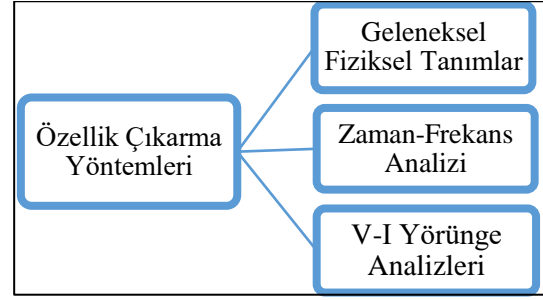
Şekil 3. Olay tespiti temel analiz yöntemleri

(Fundamental analysis methods of event detection)

MYİ çalışmalarında, özellik çıkartma aşaması, şebekede olan cihazların kendine özgü elektriksel karakteristik imzalarını veya özelliklerini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple, özellik çıkartma yöntemleri MYİ alanında büyük bir öneme sahiptir.

1.3. Özellik Çıkartma (Feature Extraction)

Genel olarak, özellik çıkartma yöntemleri, gerilim ve akım sinyallerinden bilgi elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde kullanılan özellik çıkartma yöntemleri Şekil 4'te verilmiştir. [26].

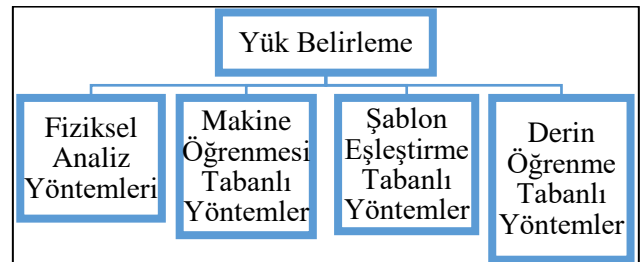


Şekil 4. Özellik çıkarma yöntemleri (Feature extraction methods)

Geleneksel fiziksel tanımlara dayalı özellik tabanlı çalışmalar genellikle, elektrikli cihazların elektriksel karakteristik özelliklerine odaklanır. Powers'ın çalışmasında, aktif güç değişimi kullanılmıştır. Öte yandan, Hart reaktif ve aktif güçlerin birleşimine dayalı yöntemler üzerinde çalışmıştır [24-27]. Özellik tabanlı zaman-frekans analiz yöntemleri, akım ve gerilim sinyallerinden yüksek frekansta daha fazla bilgi çıkarılabileceği fikriyle geliştirilmektedir [25-27]. V-I yörünge analizine dayalı özellik tabanlı yöntemler ise, Lam tarafından cihazların elektriksel karakteristiklerini tanımlamak amacıyla önerilmiştir. Bu tür çalışmalarda, V-I yörüngeleri için döngü yönü ve orta segmentin eğimi gibi parametreler kullanılmaktadır [27-28]. Bu çalışmalar sırasında başlıca zorluk, bilgi kaybıdır. Bu sebeple De Baets, güçlendirilmiş V-I yörünge yöntemini önermiş ve bu bağlamda, V-I yörünge yöntemi için bölgesel ağırlık değerlerinin kullanıldığı sonuçlar elde edilmiştir [28-29].

1.4. Yük Belirleme (Load Identification)

Yük belirleme, MYİ yönteminin kritik aşamalarından biridir. Bu aşamada, şebekeye bağlı olan elektrikli cihazların özelliklerinin sınıflandırılması için uygulanmaktadır. Bu amaçla, enerji tüketim verileri kullanılarak cihazların durumları belirlenir ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek değerlendirilmektedir. Şekil 5'te yük belirleme yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Yük belirleme yöntemleri (Load identification methods)

Fiziksel analiz yöntemleri genellikle dalga formlarının ayrıntılı bir şekilde incelendiği çalışmaları içerir. Bu yaklaşımlarda, geleneksel dalga formlarının yapısı dikkatlice analiz edilir ve bu analizler sonucunda çeşitli sonuçlar elde edilir. Dalga analizi, sinyal analizi, sayısal analiz ve görüntü işleme gibi bir dizi yöntem, uzun yıllardır literatürde kullanılan etkili araçlardan birkaçıdır. Ancak, MYİ çalışmaları genellikle sinyal analizi temelli yayınlarla daha çok öne çıkmaktadır [28-31].

Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler, MYİ çalışmalarında özellik çıkarımından sonra kullanılır. Zheng, elektriksel karakteristiklere dayalı bir sınıflandırma yaklaşımı benimsemiştir. Hassan, güçlendirilmiş SVM(destek vektör makinesi), yapay sinir ağları ve uyarlanabilir destek yöntemlerini karşılaştırmıştır. Mario ise K-En Yakın Komşuluk (KNN) yöntemini literatüre katkı sunmak için kullanmıştır, bu genellikle makine öğrenmesi çalışmalarında kullanılır. Mathis, karar ağacı ve naive bayes sınıflandırma algoritmalarını birleştirerek makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunmuştur. Ayrıca, MYİ uygulamalarında SVM kullanılmış bir çalışma da bulunmaktadır. SVM, çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanıldığından MYİ içinde uygulanması sürpriz olmamaktadır. SVM çalışmalarında genellikle sınıflandırma tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır [30-32].

Şablon eşleme temelli yük belirleme yöntemleri, genellikle önceden tanımlanmış bir sinyali anlık ölçülen sinyalle karşılaştırarak çalışır. İki türü bulunur: direkt şablon eşleme ve kombinasyon tabanlı şablon eşleme. Doğrudan şablon eşleme, ölçülen ve şablon sinyalleri arasındaki mesafeyi doğrudan ölçerek sonuç üretir. Kombinasyon tabanlı algoritmalar ise genellikle genetik algoritma veya doğrusal programlama gibi yöntemlerin kombinasyonunu içerir [48-53]. Derin öğrenme tabanlı yöntemler, literatürde makine öğrenmesi tabanlı çalışmalar gibi kabul edilir. Yapay sinir ağları ise bu alanların daha geniş bir kapsamını oluşturur. MYİ çalışmalarında, her katman farklı algoritmaların çalıştırılmasını sağlayarak esneklik ve tanımlamaları kolaylaştırır. Bir çalışmada, CNN (Evrişimsel Sinir Ağları) algoritması kullanılarak yük belirleme yöntemi uygulanmış ve %84 doğruluk elde edilmiştir [30-33]. Başka bir çalışmada, LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek) yöntemi MYİ yük belirleme için kullanılmış ve %80 kesinlik sağlanmıştır. HMM (Gizli Markov

Modeli), zaman serilerinde kullanılan bir yöntemdir. MYİ yük belirleme yöntemleri, zaman serileri çalışmalarına benzer düşünceyle, HMM'nin denendiği alanlardandır. Parson, Kolter ve Makonin [31-33], yük belirleme aşamalarında HMM kullanmıştır.

MYİ çalışmaları için yeni verilerin sürekli olarak toplanması mümkün olmayabilmektedir. Bu durumda, cihazların güç tüketimindeki farklılıklar, veri toplamanın yüksek maliyeti veya verilerin uyumsuzluğu gibi nedenlerle hazır veri setleri kullanılarak çalışmalar yürütülebilmektedir. Bu tür çalışmalar için genellikle açık erişimli veri tabanları bulunmaktadır. Bu veri tabanları, farklı algoritmaların denenmesi amacıyla bazı referans verilerini içermektedir. Çalışmaların yöntem aşamalarının değerlendirilmesi ise belirli bir ölçüt temelinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan değerlendirme ölçütleri, regresyon-sınıflandırma ölçütlerine dayanmaktadır. Regresyon ölçütleri, MYİ algoritmasının her bir cihaz tarafından ne kadar iyi tahmin edildiğini ölçmek için kullanılmaktadır. Ortalama Mutlak Hata (MAE), literatürde en yaygın kullanılan ölçütlerden biridir ve diğer makalelerle karşılaştırma yapılması gerektiğinde önemli bir rol oynamaktadır. Kök Ortalama Kare Hata (KOKH) ise tahmin edilen değer ile ölçülen gerçek değer arasındaki farkı hesaplamaktadır. Ancak bu ölçüt bazı sorunlarla karşılaşmaktadır. Ölçüm değerlerinin bir ölçek üzerinde ifade edilmesi gerektiği durumlarda, bu ölçütte bir ölçek bulunmadığından değerler birbirinden bağımsız gibi kabul edilir ve karşılaştırılmazlar. Bununla birlikte, literatürde değerlendirme kriteri olarak kullanılmaktadırlar. Regresyon Katsayısı ise doğrusal bir regresyon tahmininin kalitesini ölçmek için kullanılmaktadır. Bu ölçüt 0 ile 1 arasında değer alır ve 1'e ne kadar yakınsa modelin o kadar iyi olduğu ifade edilmektedir. Sınıflandırma ölçütleri, MYİ algoritmalarının cihazlara özgü gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki farkları tespit etmek için kullanılır. Bu ölçütler Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Sınıflandırma değerlendirme ölçütleri

(Classification evaluation criteria)

Ölçüt	Matematiksel Eşitlik
Kesinlik	$\frac{TP}{FP + TP}$
Doğruluk	$\frac{TN + TP}{TN + FN + TP + FP}$
Hassasiyet	$\frac{TP}{TP + FN}$
F-Puan	$\frac{2 * TP}{2 * FN + TP + FP}$

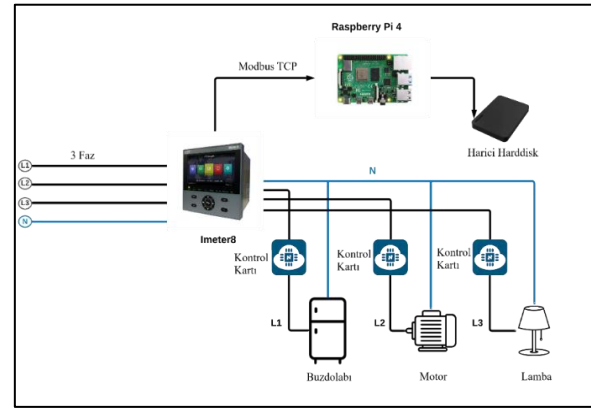
TP (Doğru Pozitif), doğru pozitif tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Bu durumda gerçek sınıf değeri 1 (mantıksal olarak doğru) ve tahmin edilen sınıf değeri de 1'dir (mantıksal olarak doğru). TN (Doğru Negatif), doğru negatif tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Bu durumda gerçek sınıf değeri 0 (mantıksal olarak yanlış) ve tahmin edilen sınıf değeri de 0'dır (mantıksal olarak yanlış). FP (Yanlış Pozitif), yanlış pozitif tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Bu durumda gerçek sınıf değeri 0 (mantıksal olarak yanlış), ancak tahmin edilen sınıf değeri 1'dir. FN (Yanlış Negatif), yanlış negatif tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Bu durumda gerçek sınıf değeri 1 (mantıksal olarak doğru), ancak tahmin edilen sınıf değeri 0'dır.

Bu çalışmada, elektrik şebekesinden elde edilen cihaz verileriyle bir veri toplama alt yapı sistemi tasarlanmaktadır. Toplanan veriler, ana şebeke ve cihaz özelinde akım, gerilim, aktif-reaktif-görünür güç ve faz farkı gibi bilgileri içermektedir. Bu veriler, 50 kHz örnekleme zamanına sahiptir ve açık erişim veri setlerinden farklılık göstermektedir. Elde edilen veriler, bir arayüz programında görselleştirilerek şebekeye bağlı cihazların uzaktan kontrol edilmesini sağlamaktadır. MYİ algoritması aşamaları, toplanan verilerin işlenmesiyle olay tespitini ve özellik çıkarma işlemini gerçekleştirmektedir. Ayrıca, toplanan veri setleri kullanılarak SVM, KNN, karar ağacı ve rastgele orman gibi sınıflandırma algoritmaları denenmektedir. Bu algoritmaların performanslarını ölçmek için karşılaştırma tabloları sunulmaktadır. Toplanan veri setlerinin performansları değerlendirilerek SVM sınıflandırma ve rastgele orman algoritmalarıyla yeni bir hibrit algoritma önerilmektedir. Bu önerilen hibrit algoritma, veri analizinde daha iyi bir performans sergileme potansiyeline sahiptir.

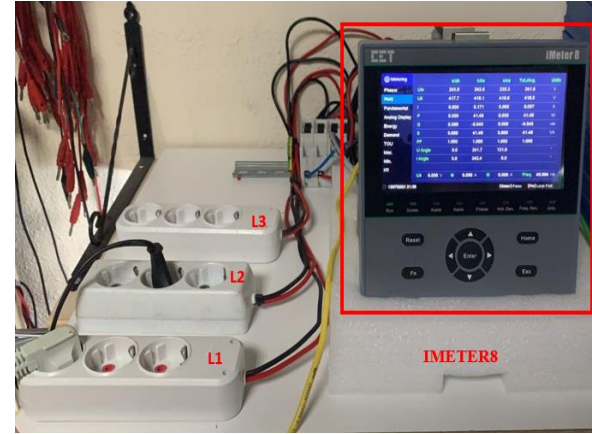
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Veri Toplama (Data Collection)

MYİ yöntemi çalışmaları, düşük ve orta güç tüketen yerlerin giriş şebekelerine takılan sensörler aracılığıyla veri elde ederek gerçekleştirilir. Bu aşamada verilerin çeşitli yöntemlerle toplanması mümkündür. Bazı çalışmalarda sensörler aracılığıyla alternatif akım ölçümleri gerçekleştirilirken, bu sayede temel ölçümler yapılabilir. Diğer çalışmalarda ise güç faktörü, harmonik bozulma ve reaktif güç ölçümleri gibi farklı parametrelerin ölçümü gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Şekil 6'da sunulan blok diyagrama uygun bir tasarım gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6. (a)Çalışmada gerçekleştirilen yapının blok diyagramı, (b)Deneysel veri toplama düzeneği

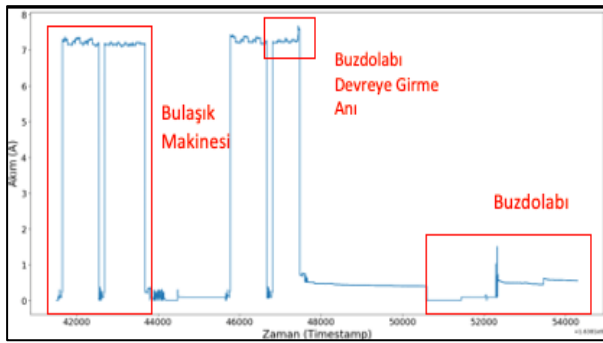
((a)Block diagram of the structure realised in the study,

(b)Experimental data collection setup)

Yapılan çalışmada, yüksek örnekleme özelliğine sahip Imeter8 enerji analizörü kullanılmıştır. Bu sistemin temel amacı, yüksek doğruluk seviyesinde veri elde etmektir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, Imeter8 enerji analizörü aracılığıyla veri toplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, farklı

karakteristik özelliklere sahip dört cihazdan veri almak için bir deney düzeneği oluşturulmuştur: Buzdolabı, saç kurutma makinesi, çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi. Akım, hat ve faz gerilimi, aktif-reaktif-görünür güç, şebeke frekansı ve güç faktörü gibi bilgiler elde edilen verilerde bulunmaktadır. Bu cihazlardan alınan veriler belirli bir senaryoya göre kaydedilmektedir. Senaryoların seçiminde, MYİ algoritmasının uygulanabilmesi için bazı kısıtlamalar dikkate alınmaktadır. Bu sınırlamalar, bir cihazın anlık durumunun değiştirilmemesi ve kaydedilen iki cihazın başlangıç zamanlarının eş zamanlı olarak başlamaması gibi etkenlere dayalıdır.

Çalışmanın diğer makalelerden ayıran bir diğer özellik, cihaz kontrol kartlarının tasarlanmasıdır. Bu kontrol kartları sayesinde cihazlar, bir arayüz üzerinden uzaktan kontrol edilebilme imkanı sağlamaktadır. Tasarlanan kontrol kartları, belirli senaryoların eklenmesiyle cihazların tepkilerinin gözlemlenmesini sağlamaktadır. Her faz için temel elektriksel değerler (aktif-reaktif güç, akım-gerilim-frekans) ve kontrol kartlarının durumu gerçek zamanlı olarak elde edilerek tasarlanan arayüz programında gösterilmektedir. Örnek olarak verilen cihazların akım grafiği Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Kaydedilen buzdolabı-bulaşık makinesi grafiği (Recorded fridge-dishwasher graph)

Şekil 7'deki gösterim, bulaşık makinesinin belirli bir süre boyunca çalıştırdıktan sonra buzdolabının etkin hale geldiği anı göstermektedir. Ardından, bulaşık makinesinin 30 dakikalık programının tamamlanmasının ardından buzdolabı tek başına çalışmasına devam etmektedir.

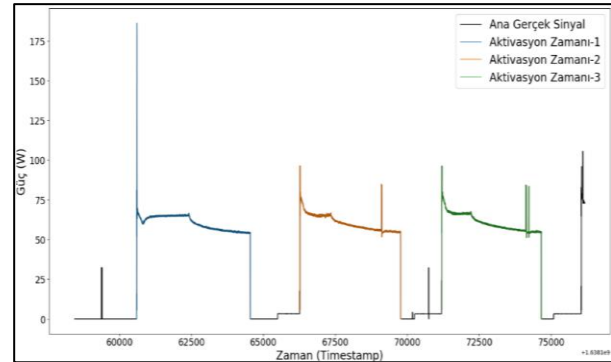
2.2. Olay Tespiti (Event Detection)

Olay tespiti, şebekeye bağlı her bir cihazın anahtarlama zamanlarının saptanmasıyla gerçekleştirilir. Genellikle, olay tespiti aktif gücün değişimi temel alınarak yapılır. İlk çalışmalardan

birinde, George W. Hart tarafından rüzgâr enerjisi verileri analiz edilmiş ve standart sapma ile önceden belirlenmiş eşik değerleri kullanılarak olay tespiti gerçekleştirilmiştir. Olasılıksal modeller ise toplam güç tüketiminin değiştiği zamanlarda meydana gelen olayları inceler. Sistemlerin devreye giriş ve çıkış zamanlarına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Ancak bu süreçler bazen çeşitli etkenlerden etkilenebilir. Geliştirilen sistemde, olay tespiti olasılıksal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Genellikle sistemlerin devreye girdiği anlarda aktif toplam güç değişiklikleri üzerine odaklanılır. Bu amaçla matematiksel olarak ifade edilen Eş. (1) formülü kullanılmaktadır.

$$\Delta P = P_{tk} - P_{tl} \quad (1)$$

ΔP , aktif gücün değişim miktarını temsil etmektedir. P_{tk} , t+1 anındaki aktif güç değerini, P_{tl} ise, t anındaki aktif gücü ifade etmektedir. Bu çalışmada olay tespiti, sistemlerin anlık değişimlerini analiz ederek gerçekleştirilmektedir. Eş. (1) kullanılarak elde edilen verilerle bir buzdolabı üzerinde olay tespiti gerçekleştirilmiş ve Şekil 8'de bu çalışmanın sonucunu gösteren bir grafik gösterilmektedir.



Şekil 8. Toplanan veri seti ile yapılan buzdolabının olay tespit grafiği (Event detection graph of the refrigerator made with the collected data set)

2.3. Özellik Çıkartma (Feature Extraction)


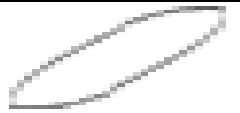






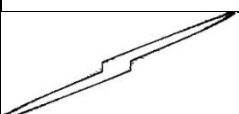
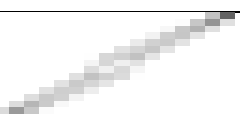
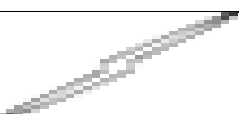
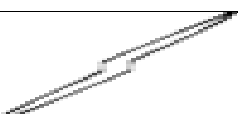




MYİ çalışmaları, cihazların benzersiz elektriksel karakteristik imzalarını veya özelliklerini analiz etmeye odaklanmaktadır. Bu nedenle, özellik çıkarma yöntemleri MYİ çalışmalarının önemli bir parçasıdır. Genel olarak, gerilim, akım, aktif güç gibi sinyallerden cihazların kimlik bilgisini elde etmek için özellik çıkarma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise özellik çıkarma aşamasında V-I yörünge tabanlı bir analiz kullanılarak cihazların sınıflandırılması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan yöntem SVM'dir. SVM, sıklıkla denetimli bir makine öğrenme algoritması olarak sınıflandırma

çalışmalarında kullanılmaktadır. Algoritmanın temel prensibi, iki nokta kümesi arasında ayırım yapabilme yeteneğidir. Bu ayırım sayesinde bir düzlem oluşturularak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilebilir. Çalışmada elde edilen V-I bilgileri uygun bir resim formatına dönüştürülerek işlenir. Cihazlar kararlı duruma geçtikten sonra, alınan akım ve gerilim verileri kullanılarak en yüksek ve en düşük akım ile gerilim değerleri belirlenir. Görüntü çözünürlüğü önceden belirlenir ve V-I genişlikleri hesaplanır. Sınıflandırmak için elde edilen görüntüler bu çözünürlük formatına çevrildikten sonra çalışılacak olan dosya şekline dönüştürülür. Görüntü aşamasının islenmesi için son aşama V-I değerlerini ikilik sisteme dönüştürülmesidir. SVM sınıflandırma algoritması için girdi değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. SVM algoritması için, görüntülerden elde edilen ölçümler ve değerlendirmeler sonucunda girdi olarak kullanılırlar. Çevresinde bağlantılı alan sayısı, bu değerlendirme aşamalarındandır. Bu ölçüt, resimlerin en küçük yapı birimi olan piksellerle matematiksel değerlendirmeler yapmak için gereklidir. Her piksel, 4-8 arasında komşu pikseli bulunmaktadır. İki piksel bir noktadan birleşirse, bu durumda piksellerin iletişim halinde olduğu söylenir. Tüm noktaların birbirlerine bağlı oldukları piksel noktalarına ise bağlantılı alan denir ve bu alan P_c olarak kullanılır. Euler numarası ise ikilik tabanda yapılan görüntü analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Euler numarası, Eş. (2) kullanılarak hesaplanır.

$$E = P_c - P_h \quad (2)$$

P_h bir görüntüdeki bağlı noktadaki delik veya boşlukları temsil etmektedir. Değişen alan oranı ise, görüntünün ikilik tabanda dönüştürülmesi sonrasında genişlemesini ifade etmektedir. Genişletilmiş görüntü ile bir önceki görüntü arasındaki alan oranı hesaplanarak P ile gösterilmektedir. Özellik çıkarma aşamaları, bir cihazın özelliklerini saptamak için gerilim-akım grafiğini görsel olarak farklı çözünürlük değerleriyle kaydetmekle başlamaktadır. Çalışmalarda farklı seçenekler olsa da en tutarlı sonuçların üretildiği 16x16, 28x28 ve 50x50 çözünürlükleri bu çalışmada kullanılmaktadır. Seçilen çözünürlüklerdeki resimler, ikilik tabanda ve 0-1 aralığında kaydedilmektedir. Cihaz seçimleri yapılırken ise kararsız durum gösteren V-I grafiğine sahip cihazlardan kaçınılmıştır. Bu sayede algoritmanın ön elemeyi geçirmesi sağlanmıştır. Bilimsel araştırmalarda, VI yörünge analizinin yüksek ayırım gücü sağladığı ve yük planlaması için kritik öneme sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu kriterlere dayalı olarak yük seçimlerinin yapılması beklenmektedir. Algoritmanın bir sonraki adımında, resimlerin çözünürlükleri değiştirilip kaydedilmektedir. İkilik tabanında ve gerçek çözünürlükte elde edilen verilerin resimleri Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2. Gerçek I-V ile farklı çözünürlüklere dönüştürülmüş I-V grafikleri (Real I-V and I-V graphs converted to different resolutions)

Cihaz Türü	Gerçek Görüntü	16 x 16	28 x 28	50 x 50
Buzdolabı				
Bulaşık Makinesi				
Saç Kurutma Makinesi				
Çamaşır Makinesi				

2.1. Yük Belirleme (Load Identification)

Yük belirleme, MYİ aşamalarının bir parçası ve bu çalışmada kullanılan son aşamayı temsil eder. Bu

aşamada, cihazların özgül özelliklerinin sınıflandırılması amaçlanır. Cihazların işletim durumları ve enerji tüketim verileri kullanılarak

hesaplamalar gerçekleştirilir. Çalışmada ise, makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Makine öğrenmesi, cihazların özellikleri çıkartıldıktan sonra sınıflandırma aşamasında kullanılan bir yöntemdir. Çalışmada karar ağaçları, rastgele ormanlar ve KNN gibi farklı tipte makine öğrenmesi tabanlı algoritmalar uygulanmıştır. Algoritmaların değerlendirilmesi genellikle doğruluk ve f-puanı gibi metrikler üzerinden yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yeni bir hibrit algoritma önerisiyle literatüre katkı sağlanmaktadır.

Karar Ağaçları Algoritması

Karar ağaçları, eski bir sınıflandırma ve regresyon yöntemi olup 1986 yılından beri kullanılmaktadır. Bu yöntemde entropiden faydalanılmaktadır. Entropi, beklenmedik bir durumun gerçekleşme olasılığını ifade eder. Rastgelelik ve belirsizliğin olasılıkla gösterildiği bir kavramdır. Bir sistem ne kadar homojen bir yapıya sahipse, entropisi o kadar düşük olur. Sınıflandırma işlemi sırasında karar ağaçları kullanılır ve bilgi kazancı bu süreçte hesaplanır. Bilgi kazancı, veri setinin özel özelliklere göre ayrıştırıldıktan sonra elde edilen entropi değerinden çıkarılarak hesaplanır. Genel formülü Eş. (3)'te verilmiştir.

$$\text{Bilgi Kazancı}(X, T) = \text{inf}(T) - \sum_{i=1}^s \frac{|T_i|}{T} x \text{inf}(T_i) \quad (3)$$

T, bir veri kümesi örnekleme setini temsil etmektedir. Inf(T), T veri kümesinin entropisini ifade eder ve X özniteliği yapısına göre T veri kümesini alt kümelerine bölmek için kullanılır. Entropinin düşük değerleri, algoritmanın performansını doğrudan etkiler. Bu çalışmada, karar ağaçları algoritmasının uygulanması için toplanan veri kümesi kullanılmıştır. Toplanan veri kümesindeki veriler ön işlemde geçirilmiş ve eğitim ve test için %80-%20 kuralına göre ayrılmıştır. Daha sonra, şebekeden alınan ana sinyalle cihazlara özgü sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

KNN Algoritması

KNN (K-En Yakın Komşu) algoritması, ilk kez 1967 yılında önerilen bir sınıflandırma ve regresyon yöntemidir. Bu yöntem, eğitim verilerinin analiz aşamasında kullanıldığı için pasif öğrenme yöntemi olarak kabul edilir. Temelde, KNN algoritması veriye özgü en yakın noktaları bulma üzerine

kurulmuştur. Bu algoritmada K değeri, bilinmeyen bir noktanın veri setindeki en yakın noktaları seçmek için kullanılır. K değeri değiştirilerek algoritmanın performansı ölçülebilir, en iyi sonuç elde edilen K değeriyle işlemler gerçekleştirilir. Bu ölçüm eşitlikleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Mesafe ölçüm eşitlikleri (Distance measurement equations)

Mesafe Ölçüm Adı	Matematiksel Eşitliği
Öklid	$\sqrt{\sum_{i=1}^k (X_i - Y_i)^2}$
Manhattan	$\sum_{i=1}^k X_i - Y_i $
Minkowski	$(\sum_{i=1}^k (X_i - Y_i ^a))^{1/a}$

Tablo 3'te verilen eşitlikler de X_i ve Y_i verilerin apsis ve ordinatlarını gösterirken k veri sayısını ve a ise parametre değerini simgelemektedir. KNN sınıflandırma yöntemleri, komşuluk seçiminde mesafe ölçümlerini kullanır. Genellikle üç farklı türde mesafe ölçümü kullanılır: Öklid, Manhattan ve Minkowski. Bu çalışmada, cihazlar ve aynı anda ölçülen ana şebeke aktif güç verisi veri seti olarak kullanılmıştır. Aktif güç verisi ile her cihaz arasında bir vektör oluşturulmuş ve bu vektörlere Manhattan mesafe ölçümü kullanılarak ağırlık değerleri atanmıştır. Ağırlık değerleri arasında karşılaştırma yapılarak KNN sınıflandırması gerçekleştirilmiştir.

Rastgele Orman Algoritması

Rastgele orman algoritması, ilk olarak 2001 yılında önerilen ve makine öğrenmesi tabanlı bir sınıflandırma ve regresyon yöntemi olarak geliştirilen bir algoritmadır. Algoritmada, karar ağaçlarının bir araya getirilerek oluşturduğu sınıflandırma yaklaşımı olarak kullanılmaktadır. Rastgele orman algoritması, yüksek doğruluk payıyla sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. Bu algoritmanın özelliği, kullanılan her bir karar ağacının rastgele alt kümelerden oluşmasıdır. Her karar ağacı, bağımsız olarak çalışarak veri setinin farklı özniteliklerini kullanır ve tahminler yapar. Ardından bu tahminler bir araya getirilerek final sonuç oluşturulur. Rastgele orman algoritması, veri setinin büyüklüğüne ve seçilen karar ağacı sayısına

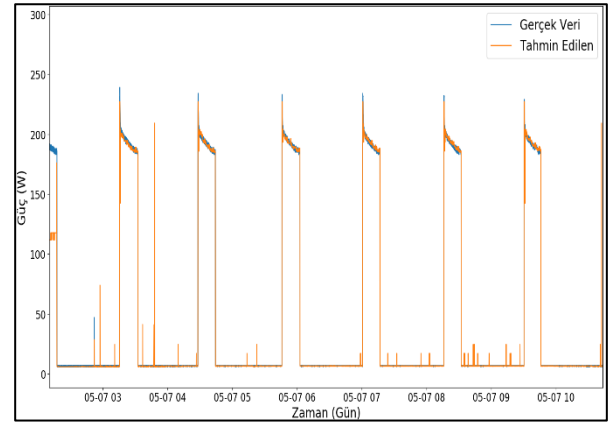
bağlı olarak hızlı ve tutarlı sonuçlar üretebilir. Bu çalışmada, rastgele orman algoritması kullanarak toplanan veri seti üzerinde uygulama yapılmıştır. Algoritmanın performansı, veri setindeki özneliklerin sınıflandırılması ve tahminlerin doğruluğu üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışma, rastgele orman algoritmasının etkili bir sınıflandırma yöntemi olduğunu göstermektedir.

Hibrit Algoritma

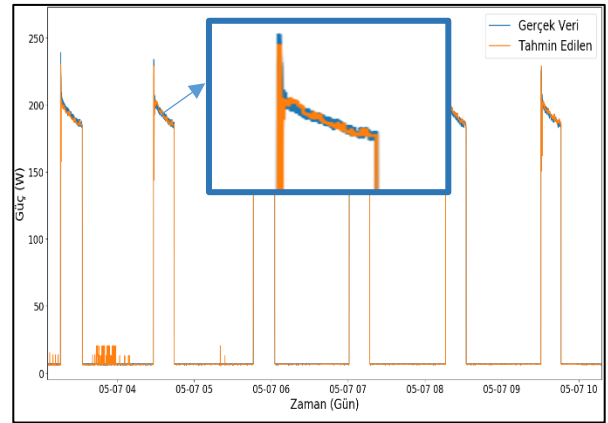
Karşılaştırmalı analizlerden elde edilen bulgularla, rastgele orman algoritmasının çalışılan diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek f-puanı ve doğruluk elde ettiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, toplanan cihaz verileriyle rastgele orman algoritmasıyla değerlendirilmektedir. Veriler, daha önce SVM algoritmasıyla da test edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki algoritmanın birlikte kullanılmasıyla yeni bir hibrit algoritma önerisi sunulmaktadır. Gerçekleştirilen algoritma sayesinde ana şebeke aktif güç sinyalinden cihaz sinyali tespit edilebilmektedir. Bu çalışma, cihazların tespit edilmesi ve sınıflandırılması konusunda etkili bir yöntem sunmaktadır. Hibrit algoritma, güç sistemleri ve enerji verimliliği alanında yeni bir yaklaşım sunarak, kullanışlı bir araç olabilir. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın güvenilirlik ve performansının yanı sıra, enerji yönetimi ve otomasyon sistemlerinde de potansiyel uygulamalarının olabileceğini göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

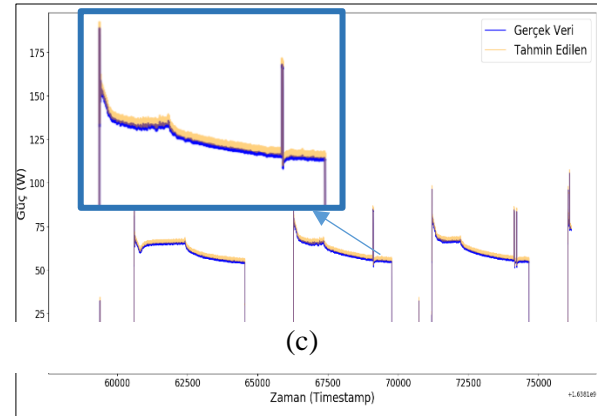
Gerçekleştirilen bu çalışmada, MYİ yönteminin uygulanan birkaç aşamasına odaklanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, verilerin lokal ortamda toplanması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, kontrol kartlarının entegrasyonu ile birlikte otomatik senaryoların gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Olay tespiti, özellik çıkarma ve yük belirleme aşamalarında ise çeşitli yöntemler deneyimlenmiştir. Özellik çıkarma işlemi SVM yöntemiyle gerçekleştirilirken, yük belirleme aşamasında KNN, karar ağacı ve rastgele orman algoritmaları kullanılmıştır. Olay tespiti ise güç değişimi izlenerek tepki anları belirlenmiştir. Algoritmaların toplanan veri seti üzerinde çalıştırılması sonucunda elde edilen buzdolabı verisinin anlık grafikleri Şekil 9'da sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. (a) Karar ağaçları gerçek ve tahmin edilen buzdolabı veri grafiği, (b) KNN gerçek ve tahmin edilen buzdolabı veri grafiği, (c) Hibrit algoritma gerçek ve tahmin edilen buzdolabı veri grafiği ((a) Decision trees real and predicted refrigerator data graph, (b) KNN real and predicted refrigerator data graph, (c) Hybrid algorithm real and predicted refrigerator data graph)

Algoritmaların veri setlerine göre değerlendirme sonuçları ise Tablo 4 ve Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 2. Veri seti ile algoritmaların değerlendirilme sonuçları (Results of the evaluation of the algorithms with the data set)

Algoritmalar	Cihaz Tipi	Doğruluk	F-Puan
Karar Ağacı	Buzdolabı	0.86	0.85
	Çamaşır Makinesi	0.88	0.87
	Bulaşık Makinesi	0.52	0.53
	Saç Kurutma Makinesi	0.81	0.84
KNN	Buzdolabı	0.88	0.86
	Çamaşır Makinesi	0.89	0.87
	Bulaşık Makinesi	0.51	0.83
	Saç Kurutma Makinesi	0.85	0.86
Rastgele Orman	Buzdolabı	0.91	0.94
	Çamaşır Makinesi	0.94	0.96
	Bulaşık Makinesi	0.60	0.62
	Saç Kurutma Makinesi	0.91	0.94

Tablo 3. Veri seti ile SVM değerlendirilme sonuçları (SVM evaluation results with data set)

Algoritma	Cihaz Tipi	Doğruluk	F-Puanı
SVM	Buzdolabı	0.67	0.47
	Bulaşık Makinesi	0.75	0.84
	Çamaşır Makinesi	0.81	0.85
	Saç Kurutma Makinesi	0.94	0.83

Tablo 4 ve Tablo 5 verileri temel alınarak yapılan doğruluk ve F puanı analizleri sonuçlarına göre, KNN ve karar ağacı algoritmalarının rastgele orman makine öğrenimi algoritmasına kıyasla daha düşük doğruluk ve kesinlik sonuçları üretmiş görülmektedir. Bu bulgular, bulaşık makinesi özelinde bu sınıflandırma algoritmalarının doğru bir çıktı sağlama konusunda etkin olmamış olduğunu göstermektedir. Özellik çıkarma aşamasında, kullanılan SVM algoritmasının farklı çözünürlük seviyelerinde performansının değiştiği tespit

edilmektedir. En iyi sınıflandırma sonuçlarının 16 x 16 çözünürlüğe sahip veri setleriyle elde edildiği belirlenmektedir. Bununla birlikte, buzdolabı gibi cihazların bu yöntemle doğru bir şekilde kategorize edilemeyeceği ortaya konulmuştur. SVM sınıflandırma algoritması ve rastgele orman algoritması kullanılarak Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 4. Veri seti ile SVM-Rastgele Orman değerlendirilme sonuçları (SVM-Random Forest evaluation results with data set)

Algoritma	Cihaz Tipi	Doğruluk	F-Puanı
Rastgele Orman + SVM	Buzdolabı	0.94	0.96
	Bulaşık Makinesi	0.89	0.96
	Çamaşır Makinesi	0.98	0.95
	Saç Kurutma Makinesi	0.93	0.94
	Saç Kurutma Makinesi	0.93	0.94

Tablo 6'daki verilerin analizi sonucunda, algoritmaların yüksek değerlere sahip olan özelliklerinin kullanılmasıyla cihazların yüksek doğruluk ve F puanına ulaştığı görülmektedir. Tablo 6'da verilen değerler [34] makalesi ile karşılaştırıldığında buzdolabı, bulaşık ve saç kurutma makinesinde F-puanı açısından geliştirildiği görülmektedir. Ayrıca çamaşır makinesi karşılaştırıldığında, doğruluk olarak bu çalışmanın daha iyi sonuç verdiği belirlenmektedir. Çalışmalarda direkt olarak aynı cihazlar kullanılsa da yük özellikleri benzer oldukları için karşılaştırma yapılabilmektedir. [34] çalışmada verilen grafikler ile bu çalışmanın grafikleri karşılaştırılması sonucunda iyileştirmenin sonucu gözlemlenebilmektedir. Naderian'ın yaptığı çalışmanın sonuçları Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 5. [34] Çalışmasının sonuçları ([34] Results of the study)

Algoritma	Cihaz Tipi	Doğruluk	F-Puanı
Hibrit Algoritma	Buzdolabı	0.94	0.90
	Bulaşık Makinesi	0.95	0.96
	Çamaşır Makinesi	0.97	0.95
	Su Isıtma Cihazı	0.93	0.76

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Yük belirleme sürecinin etkinliğini artırmak için farklı algoritmaların birleşik kullanımı, literatürde önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar, çeşitli veri kümelerinin analizi sonucunda, algoritmaların kendi içindeki güçlü yönlerinin birleştirilmesiyle daha yüksek doğruluk ve F puanı değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Özellikle hibrit algoritmanın uygulanmasıyla, bu yaklaşımın daha yüksek performansı beraberinde getirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu alanda daha fazla gelişmeye yönelik fırsatlar bulunmaktadır. Çalışmanın gelecekteki potansiyeli, mevcut algoritmaların yanı sıra yeni veri toplama yöntemleri ve kontrollü kartlar kullanılarak daha kesin sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir. Özellikle, ekonomik veri toplama kartlarının kullanımı ve geliştirilmiş sınıflandırma algoritmalarının entegrasyonu, bu alandaki araştırmaların yeni bir aşamaya taşınabileceğini işaret etmektedir. Bu şekilde, enerji verimliliği, cihazların kullanım ömrü tahmini gibi alanlarda daha kesin sonuçlar ve daha etkili yaklaşımlar elde edilebilecektir. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmanın temel amacının ötesine geçerek, gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır. Ancak, işlem sürelerinin daha da kısaltılması ve algoritmaların daha büyük veri kümeleri üzerinde test edilmesi, bu alandaki çalışmaların daha da gelişmesine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, daha yüksek işlemci kapasitelerine sahip bilgisayarlar kullanılarak daha hızlı ve verimli sonuçlar elde edilmesi öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmayı gerçekleştirirken 07/2020-15 proje numarası ile maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne teşekkür ederim.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Fethi Batıncan GÜRBÜZ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Seyfettin VADİ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Ramazan BAYINDIR: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Shi, K., Chen, Y., Yu, B., Xu, T., Yang, C., Li, L., Huang, C., Chen, Z., Liu, R., and Wu, J. (2016). Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data. *Applied Energy*, 184, 450–463.
- [2] Liu, H., Wu, H., and Yu, C. (2019). A hybrid model for appliance classification based on time series features. *Energy and Buildings*, 196, 112–123.
- [3] Hart, G. W. (1992). Nonintrusive appliance load monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 80(12), 1870–1891.
- [4] Gillis, J. M., Alshareef, S. M., & Morsi, W. G. (2016). Nonintrusive load monitoring using wavelet design and machine learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 320–328.
- [5] J. Wang, C. Pang, X. Zeng and Y. Chen, "Non-Intrusive Load Monitoring Based on Residual U-Net and Conditional Generation Adversarial Networks," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 77441–77451, 2023.
- [6] Du, Y., Du, L., Lu, B., Harley, R., and Habetler, T. (2010). A review of identification and monitoring methods for electric loads in commercial and residential buildings. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 4527–4533, Atlanta, USA
- [7] A. F. M. Jaramillo et al., "Distributed Energy Resources Electric Profile Identification in Low

- Voltage Networks Using Supervised Machine Learning Techniques," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 19469-19486, 2023
- [8] M. Ghaffar, S. R. Sheikh, N. Naseer, S. A. Usama, B. Salah and S. A. K. Alkhatib, "Accuracy Improvement of Non-Intrusive Load Monitoring Using Voting-Based Consensus Clustering," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 53165-53175, 2023
- [9] Paradiso, F., Paganelli, F., Luchetta, A., Giuli, D., and Castrogiovanni, P. (2013). ANN-based appliance recognition from low-frequency energy monitoring data. *IEEE 14th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"*, 1-6, Madrid, Spain.
- [10] Wichakool, W., Avestruz, A. T., Cox, R. W., and Leeb, S. B. (2009). Modeling and estimating current harmonics of variable electronic loads. *IEEE Transactions on power electronics*, 24(12), 2803-2811.
- [11] Dong, M., Meira, P. C., Xu, W., and Freitas, W. (2012). An event window-based load monitoring technique for smart meters. *IEEE transactions on smart grid*, 3(2), 787-796.
- [12] Roos, J. G., Lane, I. E., Botha, E. C., and Hancke, G. P. (1994). Using neural networks for non-intrusive monitoring of industrial electrical loads. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1115-1118, Hamamatsu, Japan.
- [13] Srinivasan, D., Ng, W. S., and Liew, A. C. (2006). Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1), 398-405.
- [14] Yang, H. T., Chang, H. H., and Lin, C. L. (2007). Design a neural network for features selection in non-intrusive monitoring of industrial electrical loads. *11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, 1022-1027, Melbourne, Australia.
- [15] Makonin, S. W. (2014). Real-time embedded low frequency load disaggregation, (Doctoral Dissertation, Simon Fraser University, 2014), *Dissertation Abstracts International*, 40-55.
- [16] He, D. (2016). An advanced non-intrusive load monitoring technique and its application in smart grid building energy management systems, (Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology University, 2016), *Dissertation Abstracts International*, 32-47.
- [17] Basu, K., Hably, A., Debusschere, V., Bacha, S., Driven, G. J., and Ovalle, A. (2016). A comparative study of low sampling non intrusive load disaggregation. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5137-5142, Florence, Italy.
- [18] Larcher, D., and Tarascon, J. M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, 7(1), 19-29.
- [19] Kelly, J., and Knottenbelt, W. (2015). The UK-DALE dataset, domestic appliance-level electricity demand and whole-house demand from five UK homes. *Scientific Data*, 2(1), 1-14.
- [20] Yang, C. C., Soh, C. S., and Yap, V. V. (2014). Comparative study of event detection methods for non-intrusive appliance load monitoring. *Energy Procedia*, 61, 1840-1843.
- [21] Leeb, S. B., Shaw, S. R., and Kirtley, J. L. (1995). Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3), 1200-1210.
- [22] Afzalan, M., Jazizadeh, F., and Wang, J. (2019). Self-configuring event detection in electricity monitoring for human-building interaction. *Energy and Buildings*, 187, 95-109.
- [23] Zoha, A., Gluhak, A., Imran, M. A., and Rajasegarar, S. (2012). Non-intrusive load monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey. *Sensors*, 12(12), 16838-16866.
- [24] Norford, L. K., & Leeb, S. B. (1996). Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms. *Energy and Buildings*, 24(1), 51-64.
- [25] Tabatabaei, S. M., Dick, S., and Xu, W. (2016). Toward non-intrusive load monitoring via multi-label classification. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 26-40.
- [26] Gray, M., and Morsi, W. G. (2015). Application of wavelet-based classification in non-intrusive load monitoring. *IEEE 28th Canadian conference on electrical and computer engineering (CCECE)*, 41-45, Halifax, Canada.
- [27] He, K., Stankovic, L., Liao, J., and Stankovic, V. (2018). Non-intrusive load disaggregation using graph signal processing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3), 1739-1747.
- [28] De Baets, L., Ruysinck, J., Develder, C., Dhaene, T., and Deschrijver, D. (2018). Appliance classification using VI trajectories and convolutional neural networks. *Energy and Buildings*, 158, 32-36.
- [29] Zheng, Z., Chen, H., and Luo, X. (2018). A supervised event-based non-intrusive load

monitoring for non-linear appliances. *Sustainability*, 10(4), 1001.

- [30] Mathis, M., Rumsch, A., Kistler, R., Andrushevich, A., and Klapproth, A. (2014). Improving the recognition performance of NIALM algorithms through technical labeling. 12th IEEE international conference on embedded and ubiquitous computing, 227-233, Milan, Italy.
- [31] Shen, D., and Ip, H. H. (1999). Discriminative wavelet shape descriptors for recognition of 2-D patterns. *Pattern Recognition*, 32(2), 151-165.
- [32] Luo, S., Hu, Q., He, X., Li, J., Jin, J. S., and Park, M. (2009). Automatic liver parenchyma segmentation from abdominal CT images using support vector machines. *ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 1-5, Tempe, USA.
- [33] Debnath, R., and Takahashi, H. (2004). Kernel selection for the support vector machine. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 87(12), 2903-2904.
- [34] S. Naderian, "A Novel Hybrid Deep Learning Approach for Non-Intrusive Load Monitoring of Residential Appliance Based on Long Short Term Memory and Convolutional Neural Networks," arXiv preprint arXiv:2104.07809, 2021.

Hibrit-Elektrikli İtki Sistemine Sahip Cessna 172S Uçağında Uçuş Parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyonu

Ismail ATA* 

¹Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 21/11/2023
Revision: 12/12/2023
Accepted: 12/12/2023

Keywords

Hybrid-electric propulsion system
Grey relational analysis
Electrification
Fuel saving

Makale Bilgisi

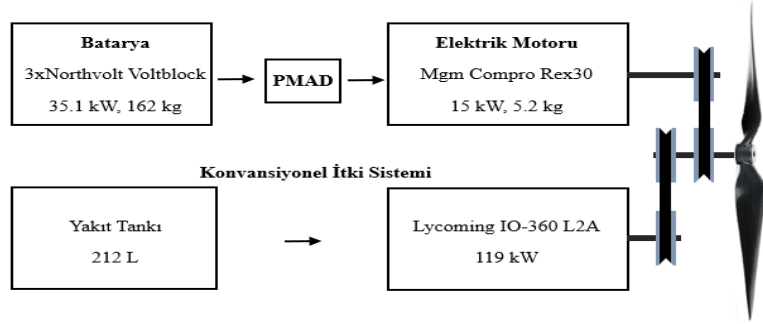
Araştırma makalesi
Başvuru: 21/11/2023
Düzeltilme: 12/12/2023
Kabul: 12/12/2023

Anahtar Kelimeler

Hibrit-Elektrikli itki sistemi
Gri ilişkisel analizi
Elektrikleşme
Yakıt tasarrufu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada, Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılarak hibrit-elektrikli itki sistemine sahip Cessna 172S uçağında yakıt ekonomisi, uçuş maliyeti ve CO₂ azaltılma değerlerine etki eden uçuş parametreleri optimize edilmiştir. / In this study, the flight parameters affecting fuel economy, flight cost and CO₂ reduction values in Cessna 172S aircraft with hybrid-electric propulsion system were optimized using the grey relational analysis method.



Şekil A: Hibrit-elektrikli itki sistemi konfigürasyonu / Figure A: Hybrid-electric propulsion system configuration

Önemli noktalar (Highlights)

- Hibrit-elektrikli itki sisteminin hava aracına uygulanması. / Application of hybrid-electric propulsion system to aircraft.
- Gri ilişkisel analiz yönteminin hava araçları uçuş parametrelerine uygulanması. / Application of the grey relational analysis method to aircraft flight parameters.
- Optimum uçuş parametrelerinin belirlenmesi. / Determination of optimum flight parameters.

Amaç (Aim): Hibrit-elektrikli itki sistemine sahip Cessna 172S uçağında yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltma için en iyi uçuş süresi ve seyir irtifasının belirlenmesi. / Determination of the optimum flight time and cruise altitude for fuel, cost savings and CO₂ reduction in Cessna 172S aircraft with hybrid-electric propulsion system.

Özgünlük (Originality): Hava araçlarında uçuş parametrelerinin gri ilişkisel analiz yöntemi ile analiz edilmesi. / Analysing the flight parameters of aircrafts with grey relational analysis method.

Bulgular (Results): Kavramsal tasarım sonucu elde edilen veriler ile gri ilişkisel analiz yöntemi ile elde edilen verilerin birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. / It has been determined that the data obtained as a result of the conceptual design and the data obtained as a result of the grey relational analysis method are compatible with each other.

Sonuç (Conclusion): Optimum yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltma değerinin olduğu görev dizilimi A3B3 olarak 120 dak uçuş süresi, 2400 m seyir irtifası için elde edilmiştir. / The mission sequence with optimum fuel, cost savings and CO₂ reduction values were obtained as A3B3 for a flight time of 120 minutes and a cruise altitude of 2400 m.



Optimization of Flight Parameters on a Cessna 172S Aircraft with Hybrid-Electric Propulsion System Using Grey Relational Analysis Method

Ismail ATA^{1*}

¹Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Astronautical Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article

Received: 21/11/2023

Revision: 12/12/2023

Accepted: 12/12/2023

Keywords

Hybrid-electric propulsion system

Grey relational analysis

Electrification

Fuel saving

Abstract

In this study, the flight parameters affecting fuel economy, flight cost and CO₂ reduction values in Cessna 172S aircraft with hybrid-electric propulsion system were optimized using the Grey Relational Analysis method. For this purpose, the flight data obtained as a result of the design for five different flight times (A) and five different cruise altitudes (B) were compared with conventional values and the optimum flight time and cruise altitude were determined. Flight missions were designed using the L_{25} (5^2) orthogonal index in five series for two different parameters. While the mission sequence with optimum fuel, cost savings and CO₂ reduction was achieved as A3B3 for 120 min of flight time and 2400 m cruising altitude, the sequence with the lowest operating performance systems was assigned as A5B1 for 180 min of flight time and 1200 m cruising altitude. The results show that the data obtained by the grey relational analysis method are in agreement with the data obtained by the conceptual analysis.

Hibrit-Elektrikli İtki Sistemine Sahip Cessna 172S Uçağında Uçuş Parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 21/11/2023

Düzeltilme: 12/12/2023

Kabul: 12/12/2023

Anahtar Kelimeler

Hibrit-Elektrik itki sistemi

Gri ilişkisel analizi

Elektrikleşme

Yakıt tasarrufu

Öz

Bu çalışmada, Gri ilişkisel Analiz yöntemi kullanılarak hibrit-elektrikli itki sistemine sahip Cessna 172S uçağında yakıt ekonomisi, uçuş maliyeti ve CO₂ azaltılma değerlerine etki eden uçuş parametreleri optimize edilmiştir. Bu amaçla beş farklı uçuş süresi (A) ve beş farklı seyir irtifası (B) için tasarım sonucu elde edilen uçuş verileri konvansiyonel değerlerle kıyaslanarak optimum uçuş süresi ve seyir irtifası belirlenmiştir. Uçuş görevleri iki farklı parametre için beş seride L_{25} (5^2) ortogonal dizin kullanılarak tasarlanmıştır. Optimum yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltılma değerinin oluştuğu görev dizilimi A3B3 olarak 120 dak uçuş süresi, 2400 m seyir irtifası için elde edilirken en düşük görev performans verilerine sahip dizilim ise A5B1 olarak 180 dak uçuş süresi, 1200 m seyir irtifalı uçuş görevi için elde edilmiştir. Gri ilişkisel analiz yöntemi ile elde edilen veriler ile kavramsal tasarım sonucunda elde edilen verilerin birbiri ile uyum içinde olduğunu görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, fosil yakıtların tüketimindeki artış enerji sürdürülebilirliğine yönelik ihtiyaç doğurmuştur. Bu ihtiyaç kısmen de hava taşıtlarının dünya genelinde hem sivil hem de askeri alanda yaygın kullanımı nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Ayrıca egzoz gazının çevre üzerine olumsuz bir etkisi vardır ve küresel ısınmaya doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu emisyonlar hava araçlarından atılan egzoz gazı ile doğrudan

atmosfere boşaltılmaktadır [1]. Artan enerji talebi ve yükselen yakıt fiyatları karşısında, hibrid-elektrikli tahrik sistemleri havacılık endüstrisinde, özellikle de hafif sektörlerde yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir [2]. Hem elektrik motorundan hem de içten yanmalı motordan yararlanan hibrit-elektrikli tahrik sistemleri yakıt tasarrufunun yanı sıra kalkış gücünü ve emisyon seviyelerinde de azalma

sağlamaktadır [3]. Son yıllarda konvansiyonel uçuşların neden olduğu emisyonları azaltmak için hibrit-elektrikli itki sistemine sahip hava araçlarının tasarımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Pernet ve Isikveren, hibrit-elektrikli itki sistemlerini ile ilgili mevcut bilgi havuzunu genişletmek amacıyla kanat altına iki gelişmiş Turbofan (GTF) ve iki Elektrikli Fan (EF) ile donatılmış dar gövdeli bir nakliye uçağında artan Hibritlik Derecesinin faydalı güce etkisinin inceyerek geleneksel bir hava aracına kıyasla yakıt azaltma potansiyelini ve verimliliğini incelemişlerdir. Sonuçlar, faydalı gücün artırılması ile yakıt sarfiyatını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [4]. Righi gerçekleştirdiği çalışmada Cessna 172R uçağını kavramsal olarak yakıt hücreleri ve batarya kullanarak hibrit-elektrikli hale getirmiş ve oluşturulan itki sisteminin uçuş için yeterli gücü sağlayabildiğini göstermiştir [5]. Friedrich ve Robertson tek koltuklu bir gösteri uçağında paralel hibrit-elektrikli tahrik sisteminin tasarımının içten yanmalı motor kullanılarak yapılan uçuşlara göre avantajlarını bilgisayar yazılımı ile modelleyerek analiz ederek optimize etmişlerdir. Ayrıca 20 kg'lık bir insansız hava aracı ve 50 tonluk bir şehirler arası yolcu uçağı için bir ölçeklendirme yaklaşımı sunarak iki farklı görev için analiz etmişlerdir [6]. Iwanizki vd. yaptıkları çalışmada kısa menzil hibrit-elektrikli uçak kavramsal tasarımını incelemişlerdir. Çalışmada referans olarak 2500 nm menzilli 17 ton faydalı yüklü ve 800 nm menzilli 13.6 ton faydalı yüklü iki uçuş görevi kullanılmış ve çalışma sonucunda %10 hibritlik derecesinin en faydalı değer olduğu tespit etmiş ve hibrit-elektrikli itki sistemi ile %2 civarında yakıt tasarrufu sağlandığını göstermişlerdir [7]. Elham ve diğ. genel havacılıkta sıvı hidrojen ve yakıt hücrelerinin kullanım potansiyellerini araştırmak için sıfırdan bir uçak tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Odak noktası, hidrojen tankı, yakıt hücreleri ve elektrik motorları gibi aktarma organlarıyla ilgili tüm bileşenlerin yanı sıra yolcu koltukları ve kargo bölümünü de dikkate alan verimli bir uçak konfigürasyonu bulmak olan çalışmalarında optimizasyon ve tasarım için SUAVE kavramsal uçak tasarım aracını kullanmışlardır [8]. Hoelzen vd. çalışmalarında bölgesel hibrit-elektrikli uçağın operasyon stratejilerini incelemişlerdir. Çalışmada batarya kullanımıyla azalan karbon ayak izi ön plana çıkarken enerji depolama araçlarının sahip olduğu özgül enerji ve güç seviyesinin uçak elektrikleşmesine yön vereceği ve uçuş görevi karakteristiklerine uygun batarya seçiminin önemli olduğuna ulaşmışlardır. Çalışmada %66 hibritlik derecesine sahip konfigürasyonlarla emisyonlarda %22 azalmanın %25 maliyet artışıyla sağlandığı, doğrudan operasyon maliyetlerinden artış olmadan

ise emisyonlarda %5'e kadar azalma sağlanabileceği görülmüştür. Menzil olarak ise hibrit-elektrikli uçakların 350 nm'ye kadar konvansiyonel uçaklarla maliyet açısından rekabet gücü olacağı çalışmanın önemli sonuçlarından [9]. Ata ve Akgül, Cessna172S uçağında hibrit elektrikli itki sisteminin kavramsal tasarımını gerçekleştirmişler ve farklı uçuşlar için konvansiyonel motora sahip uçak ile hibrit itki sistemine sahip uçağın uçuş değerlerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda hibrit itki sistemi sayesinde konvansiyonel uçuşlara göre ortalama olarak %13.1 yakıt tasarrufu, %12.3 maliyet tasarrufu ve saatte 6 kg CO₂ azaltması elde etmişlerdir [10]. Yu ve diğ. geniş gövdeli bir uçak olan Boeing 787-8 uçağına ait gerçek uçuş verilerini kullanarak hem tek noktalı (bir uçuş verisi için) hemde çok noktalı (çoklu uçuş verileri için) optimizasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, çok noktalı optimizasyondan elde edilen optimum tasarımın, baz alınan uçağın verilerine kıyasla %7.72 bir verim artışına sahip olduğunu göstermiştir [11].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, farklı hava araçları için hibrit-elektrikli itki sisteminin konvansiyonel itki sistemine sahip hava araçlarına göre avantajlarının araştırıldığı ve belirli uçuş görevleri sonucu elde edilen uçuş verilerinin birbiri ile kıyaslandığı görülmektedir. Bu çalışmada ise, literatürdeki çalışmalardan özgün olarak farklı uçuş görevlerinin hibrit-elektrikli itki sistemi verilerine etkisi optimize edilmiştir. Bu amaçla dünya genelinde yaygın kullanıma sahip olan Cessna 172S uçağı hava aracı olarak seçilmiş ve yeni bir hibrit-elektrikli itki sistemi kavramsal olarak tasarlanmıştır. Uçuş görevi olarak beş farklı uçuş süresi ve beş farklı uçuş irtifası belirlenmiştir. Kavramsal tasarımı yapılan hibrit-elektrikli itki sisteminin kullanımı açısından farklı uçuş görevlerinin yakıt ekonomisi, uçuş maliyeti ve CO₂ azaltmasına etkisini araştırmak ve optimum uçuş görevinin tespiti amacıyla Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kavramsal Tasarım (Conceptual Design)

Bu çalışmada hava araçlarında atmosfere bırakılan egzoz emisyonunun azaltılması, uçuş maliyetinin ve yakıt tüketiminin düşürülmesi amacıyla dünya genelinde yaygın olarak kullanılıyor olması, verilerine kolay ulaşılabilmesi nedeniyle Cessna 172S uçağı seçilmiş ve hibrit-elektrikli bir itki sistemi kavramsal olarak tasarlanmıştır. Bu

tasarımda konvansiyonel itki sistemine ek olarak batarya, elektrik motoru ve motor kontrol ünitesi (PMAD) Cessna172S uçağına eklenmiş ve konvansiyonel uçuşlarla kıyaslamak amacıyla uçak

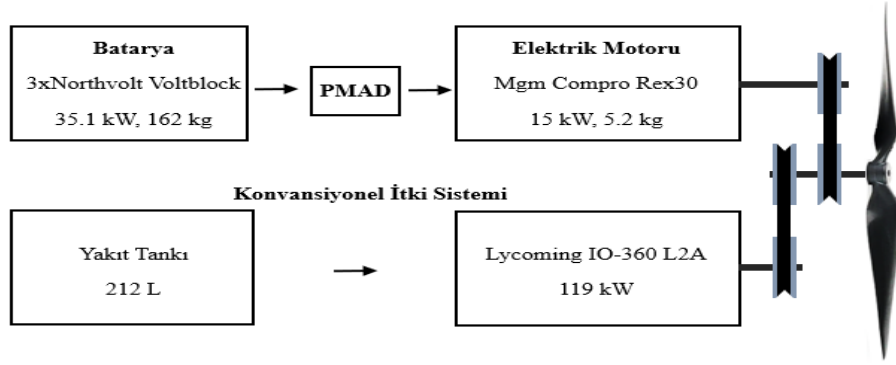
ağırlığını sabit tutabilmek için pilot koltuğu haricindeki koltukların çıkartıldığı varsayılmıştır. Tasarımda kullanılan Cessna 172S uçağına ait teknik veriler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Cessna 172S Uçağına ait teknik veriler [12] (Technical data of Cessna 172S aircraft)

Özellik	Teknik verileri
Uzunluk	8.3 m
Yükseklik	2.7 m
Kanat Açıklığı	11 m
Maksimum Kalkış Ağırlığı	1157 kg
Maksimum Faydalı Yük	405.96 kg
Maksimum Seyir Hızı	230 kmh
Maksimum Menzil	1185 km

Hibrit-elektrikli itki sistemi tasarımında uçağın maksimum kalkış ağırlığı aşılmamış bu nedenle de konvansiyonel uçuş için gerekli olan güç

gereksinimleri aynı tutulmuştur. Tasarımda elektrik motorunun uçuş süresi boyunca sürekli güç vermesi ve içten yanmalı motorun ise daha düşük güç üretecek şekilde çalışması sayesinde yakıt tasarrufu ve uçuş süresince atmosfere salınacak olan CO₂ değerinde de azaltma oluşması amaçlanmıştır. Konvansiyonel motorun paraleline elektrik motoru eklenmiş ve hibrit sistemin toplan ağırlığı 162.38 kg olmuştur. Cessna172S için maksimum faydalı yük 405.96 kg olması nedeniyle pilot ve uçak yakıtı (Avgas100LL) için geriye 237.58 kg kapasite kalmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen Hibrit-elektrikli itki sistemi konfigürasyonu Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Hibrit-elektrikli itki sistemi konfigürasyonu (Hybrid-electric propulsion system configuration)

Cessna 172S uçağında konvansiyonel motor olarak hava soğutmalı, 4 silindri Lycoming IO-360-L2A motoru kullanılmakta ve pervane olarak ise iki palli sabit hatveli McCauley 1A170E/JHA7660 kodlu pervane kullanılmaktadır. Uçakta yakıt olarak Avgas100 ve Avgas100LL yakıtları onaylı olup iki

yakıt tankında toplam 212 litre yakıt depolanabilmektedir [12]. Gerçekleştirilen hibrit elektrik itki sistemi kavramsal uygulaması için enerji kaynakları olarak Avgas100LL ve elektrik enerjisi kullanılmıştır. Bu kaynakların maliyeti ve emisyon değerleri şu şekilde hesaplanmıştır;

Avgas 100LL’nin yakılması sonucu oluşan emisyonlar [13];

$$1\text{kgAvgas100LL} + O_2 + 2\text{kgCO}_2 + 1.2\text{kgH}_2\text{O} + 1\text{kgCO} + 1.5 \times 10^{-2}\text{kgHC} + 5 \times 10^{-3}\text{kgNO}_x + 0.8 \times 10^{-3}\text{kgPb} \quad (1)$$

Elektrik motoru için gerekli olan bataryanın dolumu için şebeke elektriği kullanıldığı varsayılmış ve maliyet karşılaştırması için Avgas100LL fiyatı ortalama olarak 3 euro/litre olarak alınmıştır. Şebeke elektriğinin emisyon ve fiyat özellikleri ise Türkiye’de üretilen kWh başı şebeke elektriği emisyonları 0.455 kg CO₂, 5.59x10⁻⁶ kg CH₄, 8.88x10⁻⁶ kg N₂O olup fatura fiyatı ise 0.71 lira olarak alınmıştır [14-16].

2.2. Uçuş Görevleri (Flight Missions)

Oluşturulan kavramsal tasarımın uçuş emisyon ve maliyetlerine etkilerinin görülebilmesi için beş farklı uçuş süresi (A) ve beş farklı seyir irtifası (B) uçuş görev parametresi olarak belirlenmiştir. Uçuş süresi parametresi için belirlenen seviyeler 60 ile 180 dakika arasında 30 dakikalık artışlarla oluşturulmuştur. Seyir irtifa parametresi için ise 1200 m ile 3600 m arasında 600 m değişimlerle seviyeler belirlenmiştir. Uçuş görevlerine ait parametre ve seviyeleri Tablo 1’de görülmektedir.

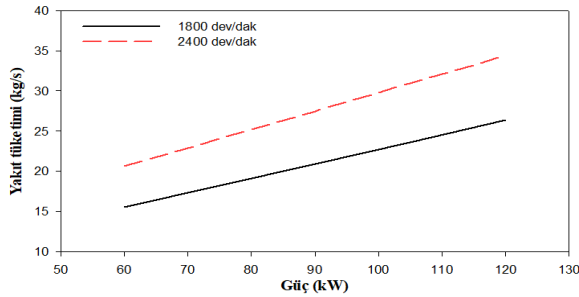
Tablo 2. Uçuş irtifa ve süreleri (Flight altitudes and times)

Sembol	Parametre	Seviye				
		1	2	3	4	5
A	Uçuş Süresi (dak)	60	90	120	150	180
B	Seyir İrtifası (m)	1200	1800	2400	3000	3600

Belirlenen uçuş görevleri deniz seviyesinden tam dolu ağırlıkla gerçekleştirilmiş ve kalkış-tırmanma, seyir ve alçalma-iniş olmak üzere toplam üç aşamadan oluşturulmuştur. Uçuş görevleri için oluşturulan aşamalar Şekil 2’de verilmiştir. Uçuşlarda motorlar kalkış-tırmanma ve seyir aşamalarında 2400 dev/dak, alçalma inişte ise 1800 dev/dak olarak çalışmıştır.

**Şekil 2.** Uçuş görev aşamaları (Flight mission phases)

Güce göre yakıt tüketimi değerlerinin bulunabilmesi için Cessna 172S uçağının motoru olan Lycoming IO-360 L2A’ya ait güç yakıt tüketimi grafiği kullanılmıştır [17]. Lycoming IO-360 L2A motoruna ait güç-yakıt tüketim grafiği Şekil 3’te verilmiştir.

**Şekil 3.** Güç-yakıt tüketimi grafiği (Power-fuel consumption graph)

2400 dev/dak için yakıt tüketimi;

$$\dot{m} = 0.23 \times P + 6.79 \quad (2)$$

1800 dev/dak için yakıt tüketim;

$$\dot{m} = 0.18 \times P + 4.72 \quad (3)$$

Burada, \dot{m} , [kg/s] tüketilen yakıt debisini ve P ise [kW] cinsinden motor gücünü göstermektedir.

2.3. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi (Grey relational analysis method)

Kavramsal olarak tasarımı gerçekleştirilen hibrit-elektrikli itki sisteminin farklı uçuş görev parametreleri açısından optimizasyonu için Gri İlişkisel Analizi (GİA) yöntemi kullanılmıştır. Uçuş görevlerinde yakıt tasarrufu, yakıt maliyeti ve CO2 azaltmayı etkileyen faktörler farklı kaynaklardan gelmektedir. Bu faktörler farklı birimlerde ve farklı kaynaklardan geldiği için birbirine benzetmek amacıyla 0 ile 1 arasında değişen normalizasyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir [18,19].

Parametre serilerinin normalizasyonunda dikkat edilmesi gereken en önemli unsur hangi yaklaşımın kullanılacağıdır. Genellikle normalizasyon işlemi Eş. 4 – Eş. 6’ya göre hesaplanmaktadır. Bu çalışmada yakıt tasarrufu, maliyet ve CO2 değerlerinin yüksek olması istendiği için normalizasyon işleminde “daha yüksek daha iyi” seçeneği kullanılmıştır. Sonuçlarının normalizasyonu aşağıdaki belirtilen üç farklı yaklaşımla yapılabilir [18,19];

“Daha yüksek daha iyi” durumunda orijinal dizin aşağıdaki gibi normalize edilebilir;

$$y_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (4)$$

Eğer “Daha düşük daha iyi” ise o zaman orijinal dizin aşağıdaki gibi normalize edilebilir;

$$y_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (5)$$

“İdeal değer daha iyi” için ise şu şekilde hesaplanır;

$$y_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (6)$$

Burada, $y_i(k)$, gri ilişkisel oluşum normalizasyon değeri, $\max x_i^0(k)$, $x_i^0(k)$ değerinin maksimum değeri, $\min x_i^0(k)$ ise minimum olduğu değerdir. x^0 ise, istenilen ideal değeri göstermektedir. GİA metodunda, gri ilişkisel dereceyi belirlerken, yirmi beş dizinin ($y_0(k)$ ve $y_i(k)$, $i=1, 2, \dots, 25$; $k=1, 2, 3$) ilişki derecesi tespit edilir. Gri ilişkisel katsayısı $\xi_i(k)$ şu şekilde hesaplanabilir [18,19];

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (7)$$

$$\Delta_{oi}(k) = \|y_0(k) - y_i(k)\| \quad (8)$$

$$\Delta_{max} = \max_{j \in I} \max_k \|y_0(k) - y_i(k)\| \quad (9)$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in I} \min_k \|y_0(k) - y_i(k)\| \quad (10)$$

Burada $\Delta_{oi}(k)$, $y_0(k)$ ve $y_i(k)$ arasındaki mutlak sapma değeri, ζ = ayırt edici katsayı (0_1); Δ_{min} , Δ_{oi} değerlerinin minimum değeri, Δ_{max} ise, maksimum değeridir. Gri ilişkisel oluşum katsayılarının ortalaması alınarak Gri ilişkisel derecesi (Υ_i) elde edilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Upsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (11)$$

Burada n, normalize edilmiş görev sonuçlarından elde edilen gri ilişkisel katsayı sayısıdır. Gri ilişkisel derecesinin yüksek olması $y_0(k)$ ile $y_i(k)$ arasında güçlü bir ilişki olduğunu gösterir. Birbiri ile karşılaştırılan iki seri değeri aynı olur ise, gri ilişkisel derecesi 1 olarak elde edilir. Gri ilişkisel derecesi ile kıyaslama yapılan seri değerinin referans olarak kullanılan seri değerine ne kadar yakın olduğunu belirler.

3.BULGULAR (RESULTS)

Tablo 3. Uçuş görevleri dizilimi ve elde edilen sonuçlar (Flight mission sequence and results obtained)

Görev No	Parametre		Parametre Seviyeleri		Sonuçlar		
	A	B	Uçuş Süresi (dak)	Seyir İrtifası (m)	Yakıt Tasarrufu (%)	Maliyet Tasarrufu (%)	CO ₂ Azaltması (kg)
1	1	1	60	1200	14.2	13.4	6.80
2	1	2	60	1800	14.4	13.5	10.3
3	1	3	60	2400	14.5	13.6	13.7
4	1	4	60	3000	11.6	10.9	13.7
5	1	5	60	3600	9.70	9.10	13.8
6	2	1	90	1200	14.3	13.5	6.70
7	2	2	90	1800	14.7	13.8	10.2
8	2	3	90	2400	14.9	14.0	13.6
9	2	4	90	3000	11.8	11.3	13.4
10	2	5	90	3600	10.0	9.40	13.7
11	3	1	120	1200	14.2	13.3	6.60
12	3	2	120	1800	14.8	13.9	10.1
13	3	3	120	2400	15.1	14.2	13.5
14	3	4	120	3000	12.2	11.5	13.6
15	3	5	120	3600	10.2	9.60	13.6
16	4	1	150	1200	13.6	12.8	6.40
17	4	2	150	1800	14.6	13.7	9.90
18	4	3	150	2400	15.0	14.1	13.4
19	4	4	150	3000	12.7	12.0	13.9
20	4	5	150	3600	10.4	9.80	13.6

Bu çalışmada, kavramsal olarak tasarımı yapılan Cessna172S uçağında hibrit-elektrikli itki sistemi sayesinde gerçekleştirilen uçuşlar ile konvansiyonel motor kullanılarak gerçekleştirilen uçuşlar yakıt, maliyet tasarrufu ve çevreye olan CO₂ salınımı açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla beş farklı uçuş süresi ve beş farklı seyir irtifasından oluşan uçuş görevleri belirlenmiş bu uçuş parametrelerinin etkileri GİA yöntemi ile analiz edilmiştir. Uçuş görevleri ve bu görevlere karşılık gelen iki parametreye bağlı olarak beş seviye faktörü ile bunlara karşılık gelen üç tepki değişkeni için ortogonal dizin olan $L_{25} (5^2)$ görev dizini tasarlanmıştır. Tablo 3’de görev numaralarına karşılık gelen ortogonal dizilim ve bunlara karşılık gelen tepki değişkenleri olan yakıt tasarrufu, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltma değerleri görülmektedir. Tablo 3’tende anlaşıldığı üzere uçuş süresinin 60 dak ile 180 dak arasındaki değişimi ve seyir irtifasının 1200 m ile 3600 m arasında değişimi sonucunda hibrit-eklektrikli itki sistemi sayesinde konvansiyonel itki sistemine göre %9.7 ile %14.9 arasında yakıt tasarrufu sağlanırken %9.1 ile %14.2 arasında maliyetten tasarrufu sağlanmıştır. CO₂ azaltması olarak bakıldığında konvansiyonel itki sistemi ile gerçekleştirilen uçuşlarda elde edilen verilere göre hibrit-elektrikli itki sistemi sayesinde 6.2 kg ile 13.9 kg arasında azalma elde edilmiştir.

21	5	1	180	1200	12.6	11.8	6.20
22	5	2	180	1800	13.9	13.1	9.70
23	5	3	180	2400	14.6	13.8	13.2
24	5	4	180	3000	12.1	11.3	13.3
25	5	5	180	3600	10.3	9.70	13.4

Belirlenen yirmi beş görev tasarımı için talep edilen sonuçlarına göre yakıt ve maliyet tasarrufu ile CO₂ azaltma değerlerinin yüksek olması talep edilmektedir. Bu sebeple “Daha yüksek daha iyi” dizin normalizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Bütün tasarım sonuçlarının normalize edilmiş $y_i(k)$ ($i=1-25$, $k=1-3$) değerlerine karşılık hesaplanan mutlak sapma değerleri $\Delta_{oi}(k)$ Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltması için elde edilen normalizasyon mutlak sapma değerlerinin ortalaması 0,0182 olarak bütün görev uçuşları içerisinde en düşük değerini aldığı görülmektedir. Normalizasyon mutlak sapma değerlerindeki azalma Gri ilişkisel derecelerini arttıracaktır.

Tablo 4. Her bir dizi için Normalizasyon değerleri için mutlak sapmalar (Absolute deviations for normalization values)

Görev No	$\Delta_{oi}(1)$	$\Delta_{oi}(2)$	$\Delta_{oi}(3)$
1	0.1667	0.1569	0.9298
2	0.1296	0.1373	0.4785
3	0.1111	0.1176	0.0286
4	0.6481	0.6471	0.0247
5	1.0000	1.0000	0.0221
6	0.1481	0.1373	0.9428
7	0.0741	0.0784	0.4915
8	0.0370	0.0392	0.0429
9	0.6111	0.5686	0.0689
10	0.9444	0.9412	0.0299
11	0.1667	0.1765	0.9558
12	0.0556	0.0588	0.5046
13	0.0000	0.0000	0.0546
14	0.5370	0.5294	0.0455
15	0.9074	0.9020	0.0390
16	0.2778	0.2745	0.9740
17	0.0926	0.0980	0.5241
18	0.0185	0.0196	0.0741
19	0.4444	0.4314	0.0000
20	0.8704	0.8627	0.0429
21	0.4630	0.4706	1.0000
22	0.2222	0.2157	0.5501
23	0.0926	0.0784	0.0988
24	0.5556	0.5686	0.0806
25	0.8889	0.8824	0.0689

Eş. 7 ve Eş. 11 kullanılarak bütün görevler için elde edilen gri ilişkisel katsayıları ve bu katsayılar

sonucunda da elde edilen gri ilişkisel dereceleri Tablo 5’te verilmiştir. Gri ilişkisel katsayıları bulunurken ayırt edici katsayı $\zeta = 0.5$ olarak alınmıştır. Tablo 5 incelendiğinde gri ilişkisel derecesinin 0.4559 ile 0.9672 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. En yüksek gri ilişkisel derecesi 0.9672 ile 13. görev dizilimi olan 120 dak’lık uçuş süresi ve 2400 m’lik uçuş irtifası için elde edildiği görülmektedir. En düşük değer ise 21 numaralı görev dizilimi olan 180 dak ve 1200 m için gerçekleşmiştir. 21 numaralı uçuş görevinde, uçuş süresinin yüksek olması nedeniyle elektrik motorundan elde edilen kazanım az olmakta ve uçuş seyirinin büyük bölümü konvansiyonel motordan elde edilen güç ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle elde edilen tasarruflarda diğer uçuş görevlerine göre daha düşük olmaktadır.

Tablo 5. Gri ilişkisel katsayıları ve Gri ilişkisel dereceleri (Grey relational coefficients and grey relational grades)

Görev No	Gri İlişkisel Katsayısı			Gri İlişkisel Derecesi, γ_i	
	$\xi_i(1)$	$\xi_i(2)$	$\xi_i(3)$		
1	0.7500	0.7612	0.3497	0.6203	14
2	0.7941	0.7846	0.5110	0.6966	9
3	0.8182	0.8095	0.9459	0.8579	4
4	0.4355	0.4359	0.9529	0.6081	16
5	0.3333	0.3333	0.9577	0.5414	23
6	0.7714	0.7846	0.3466	0.6342	11
7	0.8710	0.8644	0.5043	0.7465	7
8	0.9310	0.9273	0.9210	0.9264	3
9	0.4500	0.4679	0.8789	0.5989	18
10	0.3462	0.3469	0.9436	0.5456	21
11	0.7500	0.7391	0.3435	0.6109	15
12	0.9000	0.8947	0.4977	0.7642	6
13	1.0000	1.0000	0.9015	0.9672	1
14	0.4821	0.4857	0.9166	0.6281	12
15	0.3553	0.3566	0.9276	0.5465	20
16	0.6429	0.6456	0.3392	0.5425	22
17	0.8438	0.8361	0.4883	0.7227	8
18	0.9643	0.9623	0.8709	0.9325	2
19	0.5294	0.5368	1.0000	0.6888	10
20	0.3649	0.3669	0.9210	0.5509	19
21	0.5192	0.5152	0.3333	0.4559	25
22	0.6923	0.6986	0.4762	0.6224	13
23	0.8438	0.8644	0.8350	0.8477	5
24	0.4737	0.4679	0.8611	0.6009	17
25	0.3600	0.3617	0.8789	0.5335	24

Her bir parametre için aynı seviye değerlerinin toplanıp ortalaması alınarak o parametre için ortalama Gri ilişkisel derecesi elde edilir. Bu işlem bütün seviyelerde her bir parametre için tekrarlanarak Gri ilişkisel dereceler için tepki taplosu elde edilmiş olur. Her bir parametreye ait seviye için elde edilen tepki değerleri Tablo 6 ve Şekil 4'te görülmektedir. Tepki sonuçları “Daha

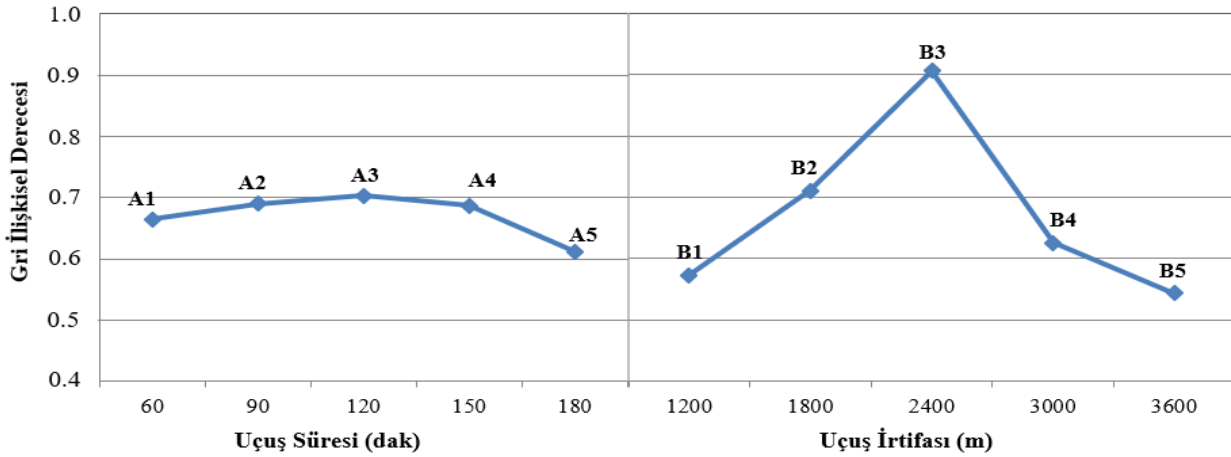
büyük daha iyi” normalizasyonuna göre değerlendirme yapılacak olur ise, A parametresinde Seviye 3 ve B parametresinde Seviye 3 değerinin en büyük değerler olduğu görülmektedir. Bu değerler A ve B parametreleri için sırasıyla 0.703 ve 0.906 olarak elde edilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 4 incelendiğinde, A3 ve B3 değerlerinin en yüksek Gri ilişkisel derecelerini verdiği görülmektedir.

Tablo 6. Gri ilişkisel dereceler için tepki tablosu “daha büyük daha iyi” (Response table for the grey relational grades “higher-the better”)

Sembol	Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Mak-Min
A	Uçuş Süresi (dak)	0.665	0.690	0.703	0.687	0.612	0.091
B	Seyir İrtifası (m)	0.573	0.710	0.906	0.625	0.544	0.363

Uçuş süreleri ve seyir irtifaları için gri ilişkisel derecelerinin verildiği Şekil 4 incelendiğinde, uçuş süresinin 60 dak ile 180 dak arasında değişimi sonucunda gri ilişkisel derecesinin 120 dak'ya kadar yükseldiği ve daha sonra düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise uçuş süresinin uzaması ile hibrit-elektrikli itki sistemindeki elektrik motorunun bataryasının uçuş süresinin artmasına bağlı olarak azalması ve konvansiyonel motorun devreye girmesidir. Seyir irtifası için Şekil 4 incelendiğinde, 1200 m irtifadan 2400 m irtifaya kadar gri ilişkisel derecesinin

önemli bir artış gösterdiği fakat 2400 m irtifadan sonraki artışlarda önemli ölçüde düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durumun nedeni ise hibrit-elektrikli itki sistemindeki elektrik motorunun tırmanma için büyük oranda güç kullanması ve bu yüzden 2400 m'ye kadar olan irtifalarda kazanımının yüksek olduğu fakat irtifa değeri 2400 m'yi aştığında artık elektrik motorunun verdiği enerjinin düşmesi sonucu konvansiyonel motorun devreye girerek yakıt ve maliyet tasarrufu ile CO₂ azaltma değerlerini etkilemesidir.



Şekil 4. Uçuş süresi ve uçuş irtifası için gri ilişkisel dereceleri (Grey relational coefficients for flight times and altitudes)

Tasarlanan hibrit-elektrikli itki sistemi ile gerçekleştirilen uçuş görevleri sonucunda yakıt ve maliyet tasarrufu ile CO₂ azaltma değerlerini en yüksek yapan optimum parametre dizilimi Tablo 7'de verilmiştir. Buna göre optimum uçuş görev dizilimi, uçuş süresi için 120 dak ve seyir irtifası için ise 2400 m olarak bulunmuştur. Uçuş süresinin 120 dak üzerine çıkması veya seyir irtifasının 2400 m üzerine çıkması durumunda tasarımı yapılan

hibrit-elektrikli itki sisteminin sağlamış olduğu tasarruf değerleri düşüş göstermektedir.

Tablo 7. Farklı parametrelerin optimum dizilimi (Optimum sequence of different parameters)

Parametre	Uçuş Süresi	Seyir İrtifası
Seviye	A3	B3
	120 dak	2400 m

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, elektrikleştirilmiş bir Cessa 172S uçağı üzerindeki yakıt ve maliyet tasarrufu ile CO₂ azaltma değerlerini etkileyen farklı uçuş süreleri ve seyir irtifalarının optimizasyonu için Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tasarımın optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçları şu şekildedir;

- Hibrit-elektrikli itki sistemi sayesinde konvansiyonel uçuşlara göre ortalama %13.1 yakıt tasarrufu, %12.3 maliyet tasarrufu ve 11.4 kg CO₂ azaltması elde edilmiştir.
- Uçuş süresinin 120 dak üzerine çıkarılması ve 2400 m seyir irtifasının üzerine çıkılması sonucu güç gereksinimi artmakta ve konvansiyone motor devreye girerek yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltma değerlerini arttırmaktadır.
- Uçuş süresinin 60 dak'dan 120 dak'ya çıkartılması ile gri ilişkisel derecesi %5.8 artarken seyir irtifasının 1200 m'den 2400 m'ye çıkarılması ile gri ilişkisel derecesi %58.2 artmıştır. Seyir irtifasının etkisi uçuş süresine göre daha fazla olarak bulunmuştur.
- Yakıt, maliyet tasarrufu ve CO₂ azaltma değerlerini en yüksek yapan optimum uçuş parametre dizilimi A3B3 (120 dak uçuş süresi ve 2400 m seyir irtifası) olarak bulunmuştur.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

O ₂	Oksijen
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
HC	Hidrokarbon
H ₂ O	Su
N ₂ O	Azot oksit
NO _x	Nitrojen oksit
nm	Deniz mili
Pb	Kurşun
PEM	Electrik motor gücü, kW
pmad	Güç yönetimi ve dağıtımı
Pt	Toplam kurulu güç, kW

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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)

Ismail ATA: Fikrin geliştirilmesi, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Developed the idea, 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] Xie Y, Savvarisal A, Tsourdos A, Zhang D, Gu J. Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. Chinese Journal of Aeronautics. 2012; 34: 432-450.
- [2] Committee on Propulsion and Energy Systems to Reduce Commercial Aviation Carbon Emissions. Commercial aircraft propulsion and energy systems research. Washington, D.C. National Academies Press. 2016.
- [3] Darecki M, Edelstenne C, Enders T. Flightpath 2050 Europe's vision for aviation. Luxembourg: European Commission. 2011.
- [4] Pernet C, Isikveren AT. Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft. Progress in Aerospace Sciences. 2015; 79: 114-135.
- [5] Righi H. Hybrid electric aircraft. Mississippi State University. 2016.
- [6] Friedrich C, Robertson PA. Hybrid-electric propulsion for aircraft. Journal of Aircraft. 2015; 52: 176-189.
- [7] Iwanizki M, Arzberger MJ, Plohr M, Silberhorn D, Hecken T. Conceptual design studies of short range aircraft configurations with hybrid electric propulsion. In AIAA Aviation 2019 Forum, Dallas, Texas, US, 2019.
- [8] Nicolay S, Kapuk S, Liu Y, Elham A. Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 2021; 46: 32676-32694.
- [9] Hoelzen J, Liu Y, Bensmann B, Winnefeld C, Elham A, Friedrichs J, Hanke-Rauschenbach R. Conceptual design of operation strategies for hybrid electric aircraft. Energies. 2018; 11: 217.

- [10] Ata I, Akgül B. Investigation of hybrid-electric propulsion system applied on Cessna 172S aircraft. *International Journal of Energy Studies*. 2023; 8: 385-399.
- [11] Chai X, Yu X, Wang Y. Multipoint optimization on fuel efficiency in conceptual design of wide-body aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2018; 31: 99-106.
- [12] Information Manual Skyhawk SP, Cessna aircraft company model 172S NAV III avionics option- GFC 700 AFCS, , Cessna Aircraft Company, Wichita, Kansas, USA, 2007.
- [13] Hospodka J, Bínová H, Pleninger S. Assessment of all-electric general aviation aircraft. *Energies* 2020; 13(23): 6206.
- [14] Turkey Electricity Generation-Transmission Statistics for 2019, 38-Graph III.I - Distribution of Turkey's electricity generation by sources in 2019, Webpage: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (Son erişim: Eylül 2021).
- [15] Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2019, National inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change, Tük, April 2021.
- [16] Webpage:https://www.tedas.gov.tr/#!/tedas_tarifeler (Son erişim: Eylül 2021).
- [17] Operator's Manual Lycoming O-360, HO-360, IO-360, AIO-360, HIO-360 & TIO-360 Series, 8th Edition, Part No. 60297-12, October 2005.
- [18] Acır A., Canlı ME, Ata I, Çakıroğlu R. Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 122: 330-338.
- [19] Çakıroğlu R, Tanürün, HE, Acır A, Üçgül F, Olkun S. Optimization of NACA 4412 augmented with a gurney flap by using grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023; 45(3): 167.

A Comparison of Digital Constant On-Time and Variable On-Time Control in Buck/Buck-Boost PFC Converter

Zafer ORTATEPE^{1*} 

¹Pamukkale University, The Department of Automotive Engineering, Denizli, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/06/2023
Revision: 19/09/2023
Accepted: 16/10/2023

Keywords

Buck/buck-boost
converter Constant
on-time control
Variable on-time
control

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/06/2023
Düzeltilme: 19/09/2023
Kabul: 16/10/2023

Anahtar Kelimeler

Buck/buck-boost
dönüştürücü
Sabit açık zaman
kontrol
Değişken açık zaman
kontrol

Graphical Abstract (Grafik Özet)

This study compares constant on-time (COT) and variable on-time (VOT) control techniques for completely digitally controlled buck/buck-boost power factor correction (PFC) converters operated in critical conduction mode (CRM). It examines the dynamic behavior of converters under various operating conditions to better understand the stability and robustness of the control system. / Bu çalışma, kritik iletim modunda (CRM) çalıştırılan tamamen dijital olarak kontrol edilen düşürücü/düşürücü-yükseltici güç faktörü düzeltme (PFC) dönüştürücüleri için sabit açık zaman (COT) ve değişken açık zaman (VOT) kontrol tekniklerini karşılaştırır. Kontrol sisteminin kararlılığını ve sağlamlığını daha iyi anlamak için dönüştürücülerin çeşitli çalışma koşulları altındaki dinamik davranışını inceler.

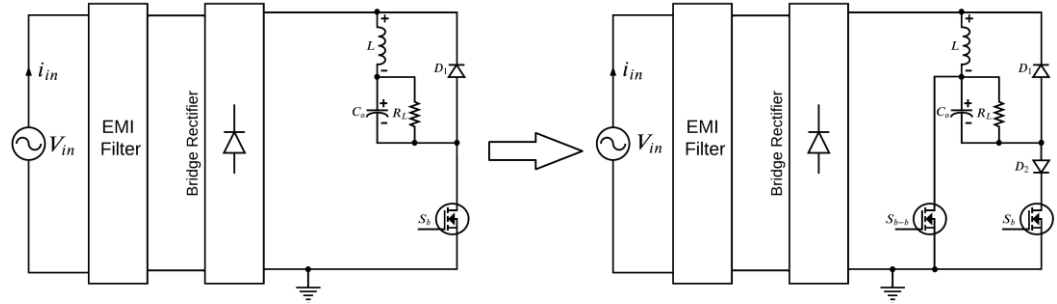


Figure A: Conventional buck PFC and buck/buck-boost PFC converter /Şekil A: Klasik düşürücü PFC ve düşürücü/düşürücü-yükseltici PFC dönüştürücü

Highlights (Önemli noktalar)

- The paper allows fully digitally controlled COT and VOT control methods to be applied to the buck/buck-boost converter. / Makale, tamamen dijital olarak kontrol edilen COT ve VOT kontrol yöntemlerinin düşürücü/düşürücü-yükseltici dönüştürücüye uygulanmasına olanak tanır.
- The THD and PF values obtained from both control methods under different load and input voltage conditions are compared. / Her iki kontrol yönteminin farklı yük ve giriş gerilimi koşulları altında elde edilen THD ve PF değerleri karşılaştırılır.
- By presenting simulation results, an important gap in the literature has been eliminated. / Simülasyon sonuçları sunularak literatürdeki önemli bir eksiklik giderilmiştir.

Aim (Amaç): The aim is to apply fully digital control methods to the buck/buck-boost PFC converter and compare the total harmonic distortion (THD) and power factor (PF) performances of these control strategies. / Amaç, düşürücü/düşürücü-yükseltici PFC dönüştürücüye tamamen dijital kontrol yöntemlerini uygulamak ve bu kontrol stratejilerinin toplam harmonik bozulma (THD) ve güç faktörü (PF) performanslarını karşılaştırmaktır.

Originality (Özgünlük): A significant weakness in the literature on this topic is the lack of simulations in the papers. The absolutely separates this study from other studies in the literature is the thorough reporting of the completely digital controlled converter simulation results. / Bu konuyla ilgili literatürdeki önemli bir zayıflık, makalelerde simülasyonların bulunmamasıdır. Bu çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan kesinlikle ayıran şey, tamamen dijital kontrollü dönüştürücü simülasyon sonuçlarının kapsamlı bir şekilde raporlanmasıdır.

Results (Bulgular): The VOT control method demonstrates higher PF and lower THD compared to the COT control method for both 220V_{AC} and 110V_{AC} input voltage under full load conditions. / VOT kontrol yöntemi, tam yük koşulları altında hem 220V_{AC} hem de 110V_{AC} giriş voltajı için COT kontrol yöntemiyle karşılaştırıldığında daha yüksek PF ve daha düşük THD gösterir.

Conclusion (Sonuç): The VOT control strategy offers the advantage over COT of dynamically adapting the on-time based on input and output voltage conditions, resulting in improved load regulation and stability. / VOT kontrol stratejisi, giriş ve çıkış voltajı koşullarına dayalı olarak açık kalma süresini dinamik olarak uyarlama konusunda COT'ye göre avantaj sunar ve bu da gelişmiş yük düzenlemesi ve stabilite sağlar.



A Comparison of Digital Constant On-Time and Variable On-Time Control in Buck/Buck-Boost PFC Converter

Zafer ORTATEPE^{1*}

¹Pamukkale University, The Department of Automotive Engineering, Denizli, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/06/2023
Revision: 19/09/2023
Accepted: 16/10/2023

Keywords

Buck/buck-boost converter
Constant on-time control
Variable on-time control

Abstract

This paper compares two frequently used control strategies for fully digitally controlled buck/buck-boost power Factor Correction (PFC) converters operated in critical conduction mode (CRM): constant on-time (COT) and variable on-time (VOT). The aim is to evaluate and compare the total harmonic distortion (THD) and power factor (PF) performance of these control strategies. The COT control technique employs a fixed on-time period for each switching cycle, resulting in a predictable and straightforward control scheme. On the other hand, VOT control dynamically adapts the on-time period based on the input and output voltage conditions, offering potential advantages in terms of load regulation and stability. Results of the paper ensure precious insights into strengths and limitations of each control technique. Additionally, the dynamic behavior of the converters under various operating conditions is investigated, shedding light on the stability and robustness aspects of each control scheme. The study is conducted using a fully digital setup and evaluated in Matlab/Simulink software platform. The results demonstrate that under steady-state conditions, VOT control superior to COT in terms of THD and PF. These results provide valuable insight on selecting a suitable control method for PFC converters, considering specific requirements of their applications.

Buck/Buck-Boost PFC Dönüştürücüde Dijital Sabit Açık Zaman ve Değişken Açık Zaman Kontrolün Karşılaştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/06/2023
Düzeltilme: 19/09/2023
Kabul: 16/10/2023

Anahtar Kelimeler

Buck/buck-boost
dönüştürücü
Sabit açık zaman kontrol
Değişken açık zaman
kontrol

Öz

Bu makale, kritik iletim modunda (CRM) çalıştırılan tamamen dijital olarak kontrol edilen düşürücü/düşürücü-yükseltici güç faktörü düzeltme (PFC) dönüştürücüleri için sıklıkla kullanılan iki kontrol stratejisini karşılaştırır: sabit açık zaman (VOT) ve değişken açık zaman (VOT). Amaç, bu kontrol stratejilerinin toplam harmonik bozulma (THD) ve güç faktörü (PF) performansını değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. COT kontrol tekniği, her anahtarlama döngüsü için sabit bir açık kalma süresi kullanır ve bu da öngörülebilir ve basit bir kontrol şemasıyla sonuçlanır. Öte yandan VOT kontrolü, giriş ve çıkış voltajı koşullarına göre açık kalma süresini dinamik olarak uyarlayarak yük düzenlemesi ve kararlılık açısından potansiyel avantajlar sunar. Makalenin sonuçları, her kontrol tekniğinin güçlü yönleri ve sınırlamaları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Ek olarak, dönüştürücülerin çeşitli çalışma koşulları altındaki dinamik davranışları incelenerek her kontrol şemasının kararlılık ve sağlamlık yönlerine ışık tutulmuştur. Çalışma tamamen dijital ortamda gerçekleştirilmiş ve Matlab/Simulink yazılım platformunda değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kararlı durum koşulları altında VOT kontrolünün, THD ve PF açısından COT'dan daha üstün olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, uygulamalarının özel gereksinimleri dikkate alınarak PFC dönüştürücüler için uygun bir kontrol yönteminin seçilmesi konusunda değerli bilgiler sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

AC/DC power conversion systems play a crucial role in various power electronic devices, enabling efficient power conversion from the AC grid to DC load. However, the increasing number of devices has given rise to a significant concern: harmonic pollution. In response, various power factor

correction (PFC) circuits have been designed to comply with IEC 61000-3-2 current harmonic standards, effectively addressing this issue. These circuits aim to ensure high PF and low THD in power systems. Among different types of AC/DC PFC converters, boost, buck-boost, buck, cuk, and sepic converters are commonly used due to their

versatility and wide range of applications. Each topology has unique benefits and drawbacks.

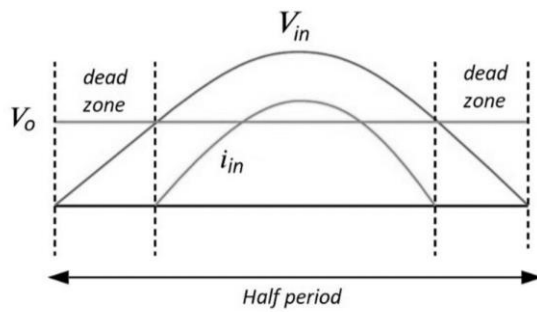


Figure 1. Current and voltage waveforms of the conventional buck PFC converter (Klasik düşürücü PFC devresinin akım ve gerilim dalga formları)

The boost PFC converter [1] increases voltage, helping to stabilize voltage and enhance power factor (PF), but it may also increase current stress on the switch due to continuous conduction mode (CCM) operation. The buck-boost PFC converter [2] combines the benefits of both boost and buck converters but requires careful design to mitigate switching losses. Also, even if the topology has a single switch, inversion of output leads to a complex sensing and feedback circuit. Cúk [3] and sepic [4] PFC converters are known for their ability to provide step-up/step-down capability of the output voltage and to reducing voltage stress on semiconductors, ideal for high-power applications. However, the main drawback of these topologies is that they have the same voltage gain as buck-boost converters but require more components. On the contrary, the buck PFC converter efficiently reduces voltage, improving voltage stress on the switches, voltage regulation, and conduction losses, making it suitable for applications where voltage reduction is required. Nevertheless, due to its dead zones, the conventional buck PFC converter is unable to control the input current to be fully sinusoidal, which results of significant losses in regions where the input voltage is lower than the output voltage. Consequently, the circuit has trouble meeting with the IEC61000-3-2 current harmonic limits. Figure 1 shows the input and output voltages as well as the input current waveforms for conventional buck PFC converter within a half period.

The implementation of the constant on-time (COT) control method to the buck PFC converter was first discussed in [5]. In this study, where dead zones could not be entirely eliminated, a power factor (PF) of 0.965 was achieved. First study in which variable on-time (VOT) control method is applied to the buck PFC converter is presented in [6]. However, the reported study was unable to eliminate dead zones. Another noteworthy study in which the COT

control method and soft switching technique are used both to the buck converter is presented in [7]. The study on eliminating the dead zones of the buck PFC converter with additional circuit is given in [8]. The new topology obtained by adding a switch and two diodes is superior to the conventional ones. The implementation of the fully analog VOT control method to the flyback circuit is given in [9]. A study on the control of the buck PFC converter with the COT control method is also presented in [10]. However, dead zones could not be controlled. The study in which flyback topology is added to eliminate dead zones in the forward converter is presented in [11]. The forward PFC converter is similar to the buck PFC converter in that it has dead zones in regions where the input voltage is lower than the output voltage.

It is presented in the fully analog controlled buck PFC converter [12], where the switching frequency is reduced with the VOT control method. In addition, the study in which the improved VOT control technique is applied to a fully analog controlled CRM flyback PFC converter is given in [13]. The implementation of VOT control technique to buck-flyback PFC topology is explained in [14]. The application of the VOT control technique to a fully digitally controlled flyback topology is first presented in [15]. Fully analog VOT controlled buck/buck-boost PFC converter implementation is given in [16]. Segmented COT control method is applied to the buck/buck-boost PFC converter in [17]. Besides, fully analog constant switching frequency control method for the conventional buck/buck-boost PFC converter is applied in [18]. In [19], fixed on-time ratio control (FOTRC) and fixed duty-cycle ratio control (FDCRC) method have been implemented to the buck/buck-boost PFC converter. Finally, the buck PFC topology controlled by only single switch is given in [20]. In the literature, other than the COT and VOT control techniques, some papers based on soft switching techniques have also been presented to eliminate dead zones of the buck PFC converter [21], [22].

Analog control approach is proposed in almost all of the above-mentioned studies. Major gap in the literature regarding this topic is the lack of presentation of simulations in the papers. This paper presents a comparison for fully digital COT and VOT control methods and its implementation for buck/buck-boost PFC topology given in [16]. The complete reporting of simulation results of fully digital controlled converter in this study stands out as the most important aspect that separates it from other studies in the literature. The simulation is carried out in MATLAB/Simulink.

The rest of this paper is as follows: In section 2, operating principle of the buck/buck-boost converter is presented. Analysis and implementation of the COT and VOT control methods is presented in section 3. Results of the study are given in section 4. Finally, the conclusion section is presented.

2. OPERATING PRINCIPLE OF THE CRM BUCK/BUCK-BOOST CONVERTER (DÜŞÜRÜCÜ/DÜŞÜRÜCÜ-YÜKSELTİCİ DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN ÇALIŞMA PRENSİBİ)

Figure 2 shows the main circuit of the buck/buck-boost converter topology. The topology consists of EMI filter, universal bridge rectifier, inductor (L), output capacitor (C_o), freewheeling diode (D_1), output load (R_L), buck (S_b) and buck-boost switches (S_{b-b}).

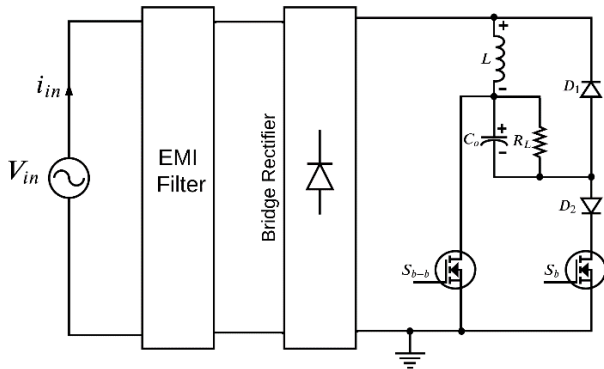
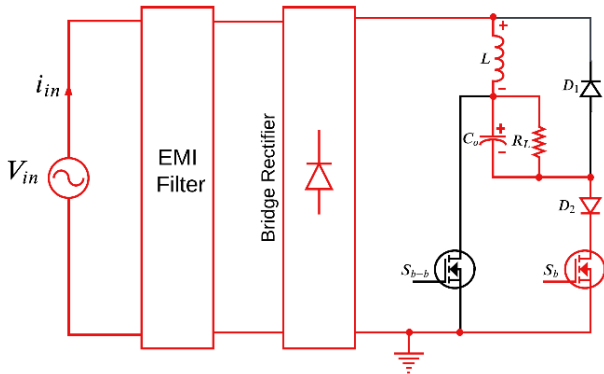
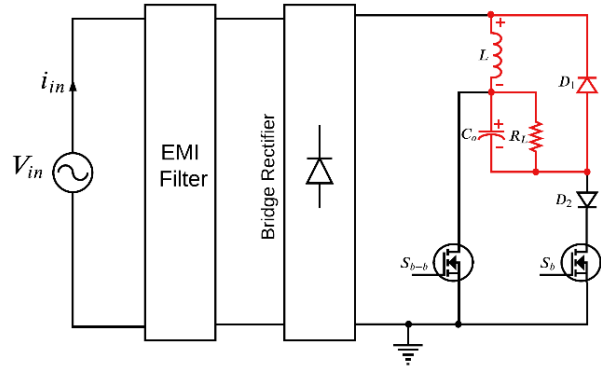


Figure 2. Main circuit of the buck/buck-boost converter topology ([16]) (Düşürücü/düşürücü-yükseltici topolojisinin ana devresi)

When input voltage is greater than output voltage, converter operates in buck mode; otherwise, it operates in buck-boost mode. Circuit is controlled in CRM and the steady state analysis can be implemented in two cases: $V_{in} > V_o$ and $V_{in} < V_o$.



(a)



(b)

Figure 3. Operation modes of the topology in buck mode (a) S_b is turned-on (b) S_b is turned-off (Düşürücü modunda topolojinin çalışma modları (a) S_b açık (b) S_b kapalı)

When $V_{in} > V_o$, the topology operates in buck mode. S_b switch is active and S_{b-b} switch is in zero state, during this mode. Therefore, this mode has two states depending on the position of the S_b switch. These modes are given in Figure 3 (a) and (b), respectively. Besides, current shapes of the topology operated in CRM buck mode is shown in Figure 4.

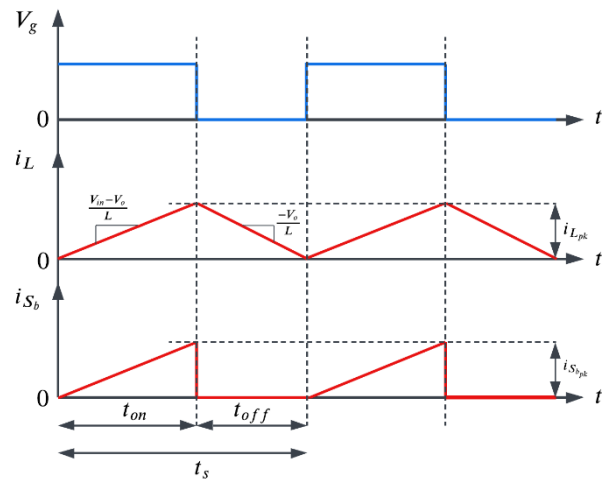


Figure 4. Current shapes of the topology operated in CRM buck mode (CRM düşürücü modda çalışan topolojinin akım biçimleri)

The detailed equations of the circuit operating in buck mode can be examined in [16]. During the buck mode, average input current of the converter is calculated as:

$$i_{in_{b,avg}} = \frac{1}{2} i_{L_{pk1}} D_b \tag{1}$$

$$i_{in_{b,avg}} = \frac{V_o(V_{max}|\sin\omega t| - V_o)t_{on}}{2LV_{max}|\sin\omega t|} \tag{2}$$

where i_{Lpk_1} is inductor current peak value, D_b is duty cycle ($D_b = t_{on}/t_s$), $V_{max}|\sin\omega t|$ is sinusoidal input voltage, V_o is output voltage, L is inductor value and $i_{in_{b,avg}}$ is average input current value of the converter in buck mode.

When $V_{in} < V_o$, the topology operates in buck-boost mode. S_{b-b} switch is active and S_b switch is in zero state during this mode. Therefore, this mode has two states depending on the position of the S_{b-b} switch. These modes are shown in Figure 5 (a) and (b), respectively. Besides, the current shapes of the buck/buck-boost converter topology operated in buck-boost mode is given in Figure 6.

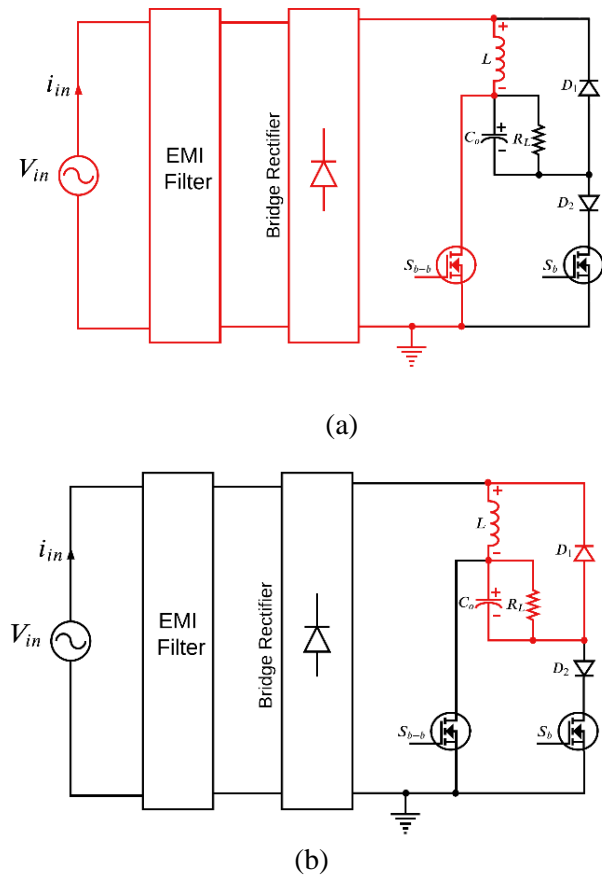


Figure 5. Operation modes of the topology in buck-boost mode (a) S_{b-b} is turned-on (b) S_{b-b} is turned-off (Düşürücü-yükseltici modunda topolojinin çalışma modları (a) S_{b-b} açık (b) S_{b-b} kapalı)

The detailed equations of the circuit operating in buck-boost mode are given in [16]. During the buck-boost mode, average input current of the converter is calculated as:

$$i_{in_{b,avg}} = \frac{1}{2} i_{Lpk_2} D_{b-b} \tag{3}$$

$$i_{in_{b-b,avg}} = \frac{V_o V_{max} |\sin\omega t|}{2L(V_{max} |\sin\omega t| + V_o)} t_{on} \tag{4}$$

where i_{Lpk_2} is inductor current peak value, D_{b-b} is duty cycle ($D_{b-b} = t_{on}/t_s$) and $i_{in_{b-b,avg}}$ is average input current value of the converter in buck-boost mode.

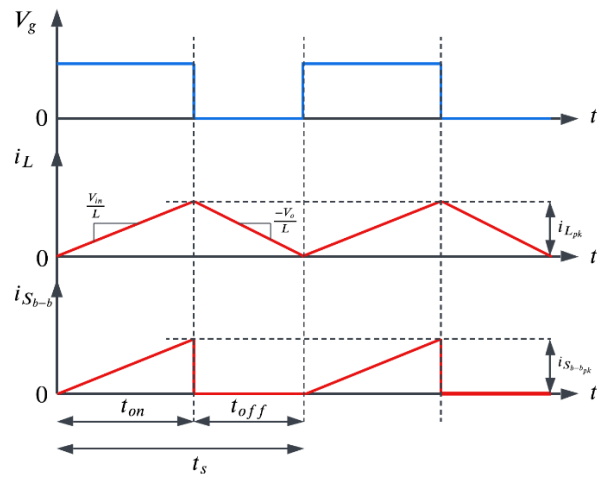


Figure 6. Current shapes of the topology operated in CRM buck-boost mode (CRM düşürücü-yükseltici modda çalışan topolojinin akım biçimleri)

3. IMPLEMENTATION OF DIGITAL COT CONTROL METHOD (COT KONTROL METODUNUN UYGULANMASI)

According to the analysis above, the average input current for the COT control is defined as follows:

$$i_{in_{COT}} = \begin{cases} \frac{t_{on} V_o}{2L} \left(\frac{V_{max} |\sin\omega t| - V_o}{V_{max} |\sin\omega t|} \right) & (\theta \leq \omega t \leq \pi - \theta) \\ \frac{t_{on} V_o}{2L} \left(\frac{V_{max} |\sin\omega t|}{V_{max} |\sin\omega t| + V_o} \right) & (0 \leq \omega t \leq \theta \ \& \ \pi - \theta < \omega t < \pi) \end{cases} \tag{5}$$

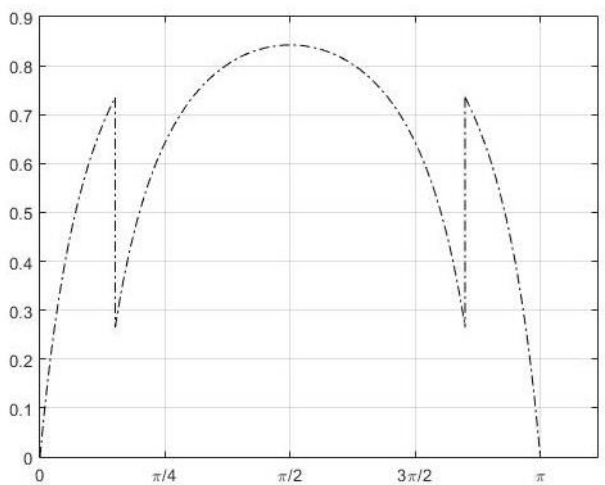


Figure 7. Average input current waveform of the COT controlled buck/buck-boost topology (COT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici topolojinin ortalama giriş akımı dalga formu)

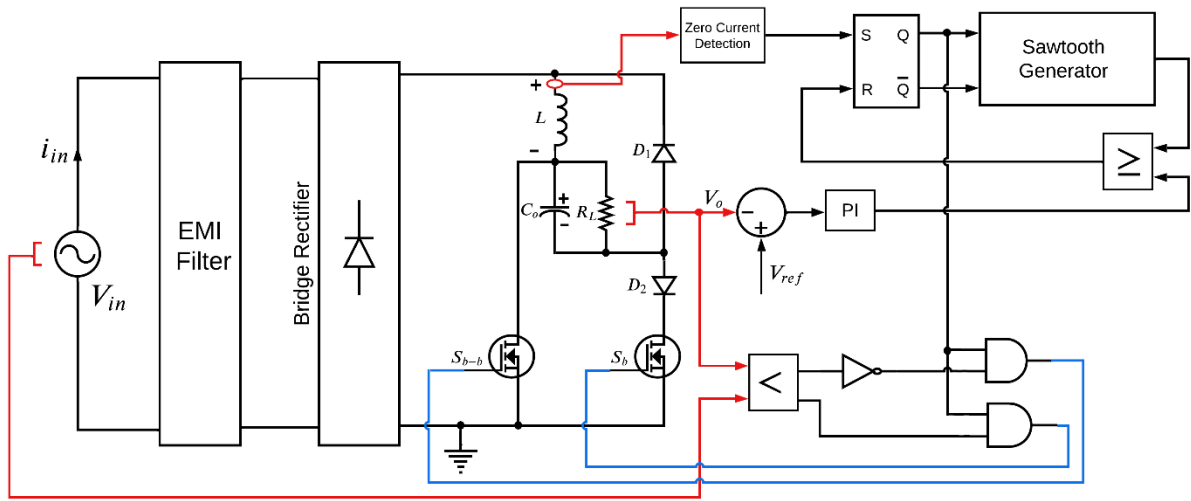


Figure 8. Control scheme for the digital COT controlled CRM buck/buck-boost topology (Dijital COT kontrollü CRM düşürücü/düşürücü-yükseltici topoloji için kontrol şeması)

While t_{on} , V_o , and L terms are constant in steady-state, terms in parentheses are not sinusoidal according to the equation (5). Hence, in the COT method, it is not possible for the average input current to be sinusoidal. Figure 7 shows average input current resulting from COT control for $220\sin(\omega t)$ input voltage, $80V_{DC}$ output voltage, $100W$ output power and $L = 118\mu H$ conditions.

equations, [16] can be examined. Digital control scheme for COT controlled buck/buck-boost topology is given in Figure 8. Zero current detection method is used for the detection zero points of inductor current. Gate signals of the switches are generated by SR flip-flop and a digital sawtooth generator block. This control scheme ensures variable switching frequency and forces to obtain sinusoidal input current.

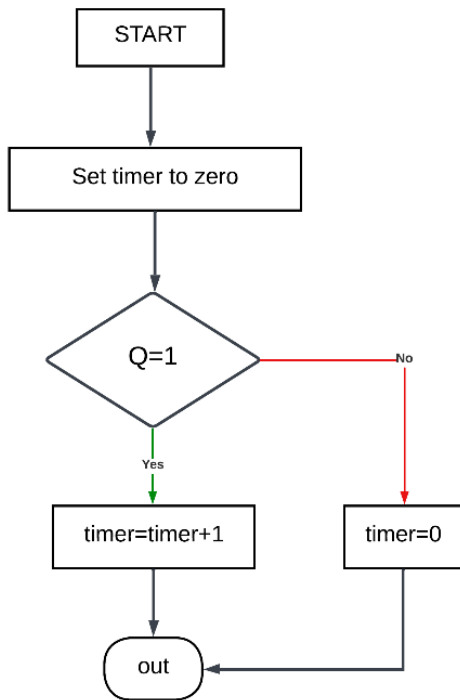


Figure 9. The flowchart of the sawtooth generator algorithm (Testere dişi jeneratör algoritması akış diyagramı)

The aim of this paper is not to give all mathematical equations, but to simplify the study and perform it in a digital environment. For detailed analysis of all

In Figure 8, the digital component responsible for enabling the COT operation of the circuit is the sawtooth generator block. The flowchart of this block is provided in Figure 9. According to the flowchart, when the switch is on-state, the timer continuously counts; while when it is off-state the timer is reset. The data obtained at the output of this sawtooth generator block is compared with the data from the PI block as shown in Figure 8, leading to the resetting of the SR-type flip-flop.

4. IMPLEMENTATION OF DIGITAL VOT CONTROL METHOD (VOT KONTROL METODUNUN UYGULANMASI)

To provide unity PF in buck operation mode, t_{on} in equation (5) should be expressed as follows.

$$t_{on} = \frac{(V_{max}|\sin\omega t|)^2}{V_o(V_{max}|\sin\omega t| - V_o)} \quad (\theta \leq \omega t \leq \pi - \theta) \quad (6)$$

Therefore, average input current in buck mode is calculated as follows:

$$i_{in_{avg}} = \frac{V_{max}|\sin\omega t|}{2L} \quad (\theta \leq \omega t \leq \pi - \theta) \quad (7)$$

Also, to provide unity PF in buck-boost operation mode as given in (5), t_{on} should be expressed as follows.

$$t_{on} = \frac{V_{max}|\sin\omega t| + V_o}{V_o} \quad (8)$$

$(0 \leq \omega t \leq \theta \ \& \ \pi - \theta < \omega t < \pi)$

Hence, average input current in buck-boost mode is calculated given below:

$$i_{in_{b,avg}} = \frac{V_{max}|\sin\omega t|}{2L} \quad (9)$$

$(0 \leq \omega t \leq \theta \ \& \ \pi - \theta < \omega t < \pi)$

As a result, in buck-boost mode, average input current of the topology is given below:

$$i_{in_{VOT}} = \begin{cases} \frac{V_{max}|\sin\omega t|}{2L} \\ (\theta \leq \omega t \leq \pi - \theta) \\ \frac{V_{max}|\sin\omega t|}{2L} \\ (0 \leq \omega t \leq \theta \ \& \ \pi - \theta < \omega t < \pi) \end{cases} \quad (10)$$

According to the equation (10), input current of the converter is pure sinusoidal for all conditions (buck and buck/buck-boost modes) and ensure high PF and low THD. Figure 10 shows average input current resulting from VOT control for $220\sin(\omega t)$ input voltage, $80V_{DC}$ output voltage, $100W$ output power and $L = 118\mu H$ conditions.

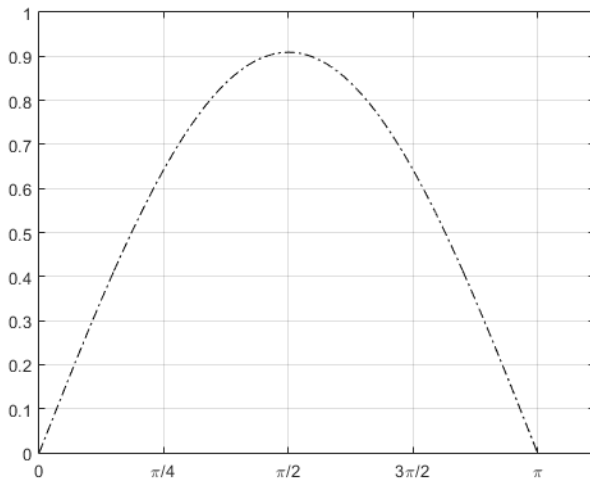


Figure 10. Average input current waveform of VOT controlled buck/buck-boost topology (VOT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici topolojinin ortalama giriş akımı dalga formu)

When the S_b switch is turned-on, the current across the current sense resistance can be expressed as follows:

$$v_{RS_1} = \frac{V_{max}|\sin\omega t| - V_o}{L} t_{on} \quad (11)$$

When equation (6) is applied to equation (11):

$$v_{RS_1} = \frac{(V_{max}|\sin\omega t|)^2}{V_o L} \quad (12)$$

In addition, when the S_{b-b} switch is turned-on, the current across the current sense resistance can be expressed as follows:

$$v_{RS_2} = \frac{V_{max}|\sin\omega t|}{L} t_{on} \quad (13)$$

When equation (8) is applied to equation (13):

$$v_{RS_2} = \frac{(V_{max}|\sin\omega t|)(V_{max}|\sin\omega t| + V_o)}{V_o L} \quad (14)$$

The operating principle of the VOT control method is based on generating a reference inductor current and comparing the actual inductor current with this reference. The mathematical equation of the reference inductor current for buck mode is calculated as follows:

$$i_{L_{ref_buck}} = (K_{p_1}(V_{ref} - V_o) + K_{i_1} \int (V_{ref} - V_o) dt) \left(\frac{V_{max}|\sin\omega t|}{V_o L} \right) \quad (15)$$

where V_{ref} is reference output voltage, V_o is actual output voltage, K_{p_1} and K_{i_1} are proportional and integral terms of the PI controller. Besides, for the proportional and integral terms of PI controller $K_{p_1} = 0.1$ and $K_{i_1} = 7$ coefficients are used.

Also, the mathematical equation of the reference inductor current for buck mode is calculated as follows:

$$i_{L_{ref_buck}} = (K_p(V_{ref} - V_o) + K_i \int (V_{ref} - V_o) dt) \left(\frac{V_{max}|\sin\omega t|}{V_o L} \right) \quad (16)$$

$K_{p_2} = 0.1$ and $K_{i_2} = 3$ coefficients are used for the PI controller's proportional and integral terms, respectively.

Digital control scheme for VOT controlled buck/buck-boost converter is shown in Figure 11. In this figure V_{in} represents $V_{max}|\sin\omega t|$. Zero current detection method is used for the detection zero points of inductor current. Gate signals of the switches are generated by the SR flip-flop. This control scheme ensures variable switching frequency to provide pure sinusoidal input current. Although the VOT control method is more complex than the COT method, it gives better results in terms of sinusoidal input current, PF and THD.

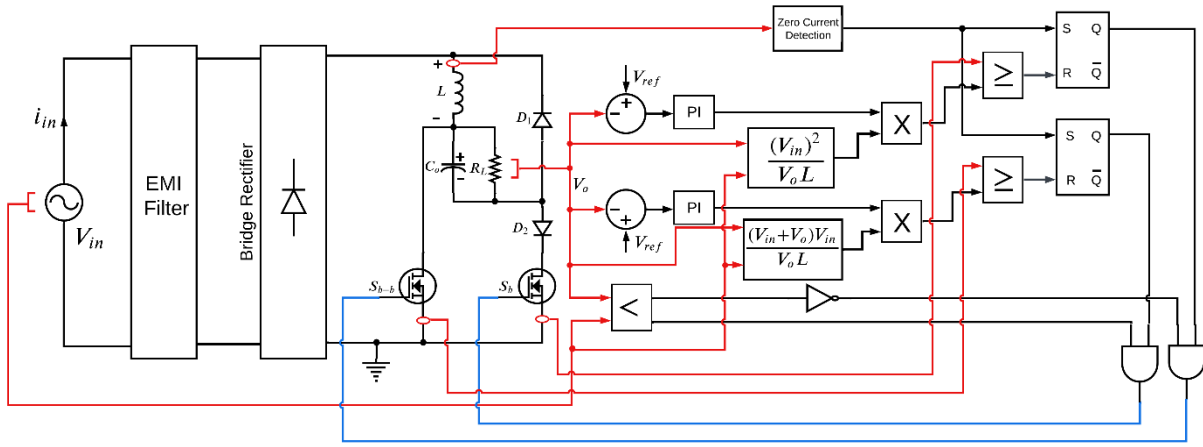


Figure 11. Control scheme for the digital VOT controlled CRM buck/buck-boost topology (Dijital VOT kontrollü CRM düşürücü/düşürücü-yükseltici topoloji için kontrol şeması)

5. SIMULATION RESULTS (SİMÜLASYON SONUÇLARI)

The simulation studies are carried out by the MATLAB/Simulink software platform to evaluate the performance of COT and VOT control methods under various parameter variation conditions. PF and THD values are obtained as the key metrics for comparison. Besides, the key variables used to carry out the simulation are listed in Table 1.

Table 1. The key variables used to carry out the simulation (Simülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan temel değişkenler)

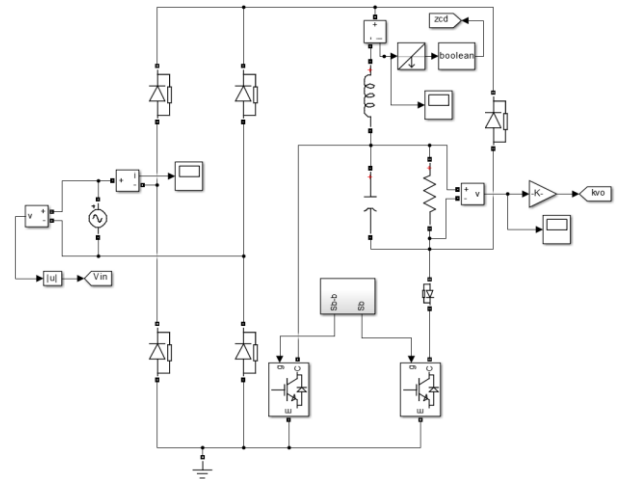
Parameters	Symbols	Values
Input voltage	V_{in}	90-270 [V _{AC}]
Output load	R_L	64 [Ω]
Inductance	L	118 [μ H]
Capacitor	C_o	1000 [μ F]
Output power	P_o	100 [W]
Line frequency	f	50 [Hz]

A digital low pass filter is used for a non-filtered input current. Transfer function block in MATLAB/Simulink is used for the filter of input current and transfer function of this digital low pass filter is given below:

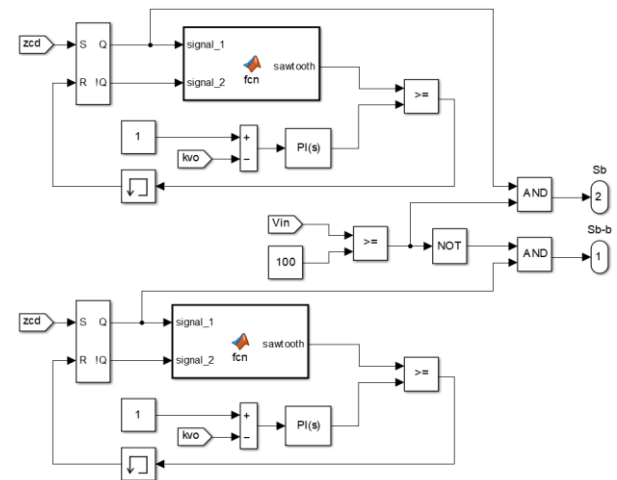
$$Filter_{TF} = \frac{1}{0.0003s+1} \quad (17)$$

Figure 12 (a) shows the control scheme of the digital COT controlled buck/buck-boost converter in MATLAB/Simulink. Besides, Figure 12 (b) shows

the digital COT controller design. It can be seen from the figure that a separate sawtooth wave generator is used for both switching elements.



(a)

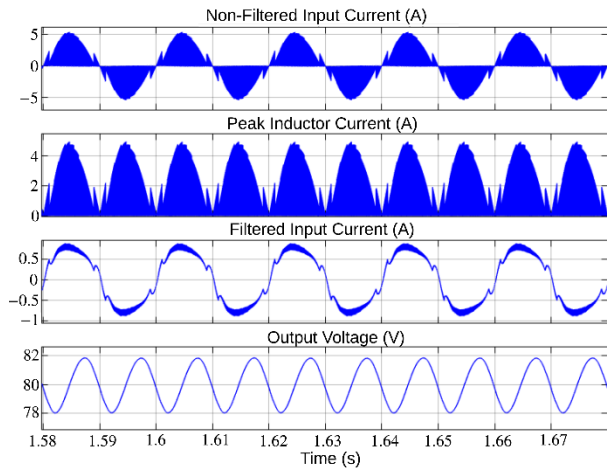


(b)

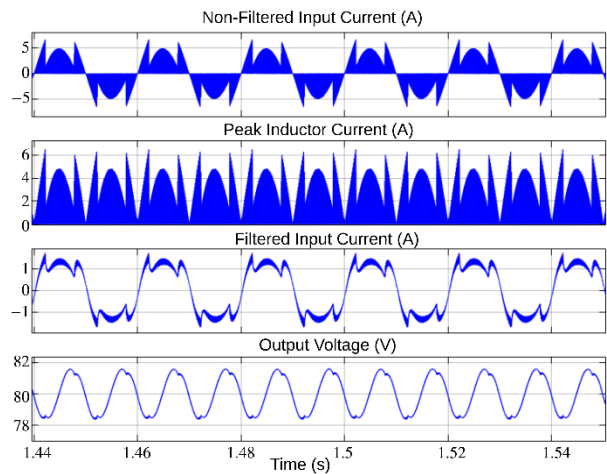
Figure 12. (a) Control scheme of the digital COT controlled converter (b) controller design (a) Dijital

COT kontrollü dönüştürücünün kontrol şeması (b) kontrolör dizaynı)

Figure 13 (a) and (b) show the input current, inductor current, filtered input current and output voltage waveforms of the digital COT controlled buck/buck-boost converter for 220V_{AC} and 110 V_{AC} input voltage conditions, respectively. As can be seen from the figure, input current quality suffers as the input voltage decreases in the COT control method.



(a)

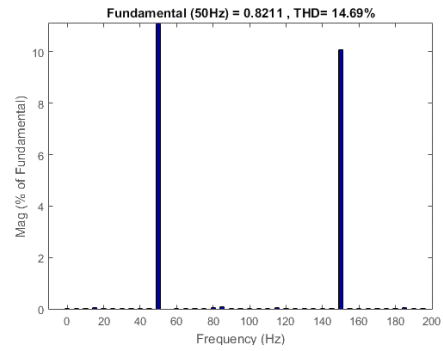


(b)

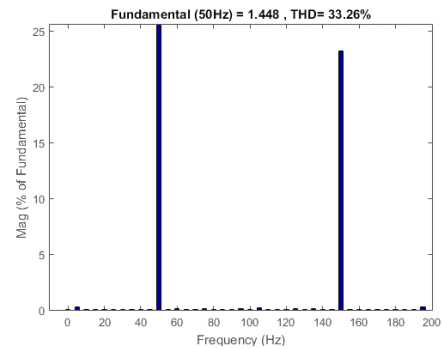
Figure 13. Input current waveform of the digital COT controlled buck/buck-boost converter (a) for 220V_{AC} input voltage condition (b) for 110V_{AC} input voltage condition (Dijital COT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici dönüştürücünün giriş akım formu (a) 220V_{AC} giriş gerilimi koşulu için (b) 110V_{AC} giriş gerilimi koşulu için)

For the COT control method, the simulation reveals a PF of 0.98 and a THD value of 14.69% for the 220V_{AC} input voltage condition as shown in Figure 14 (a). Similarly, for the 110 V_{AC} input voltage condition, the power factor is measured as 0.94 with a THD value of 33.26% as shown in Figure 14 (b).

These results under steady-state conditions indicate the performance of the COT control method.



(a)



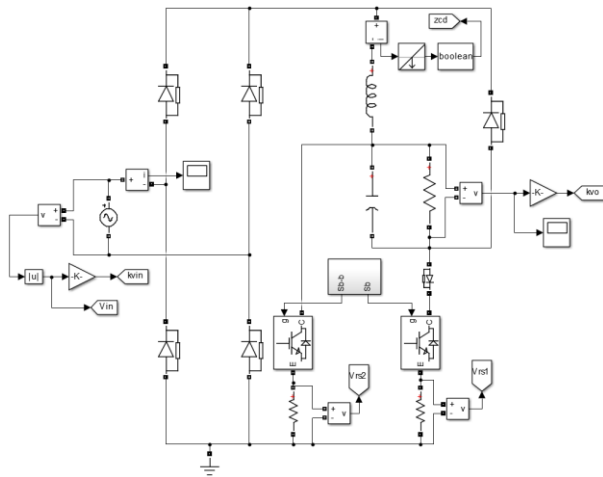
(b)

Figure 14. Input current THD values of digital COT controlled buck/buck-boost converter (a) for 220V_{AC} input voltage condition (b) for 110V_{AC} input voltage condition (Dijital COT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici dönüştürücünün giriş akım THD değerleri (a) 220V_{AC} giriş gerilimi koşulu için (b) 110V_{AC} giriş gerilimi koşulu için)

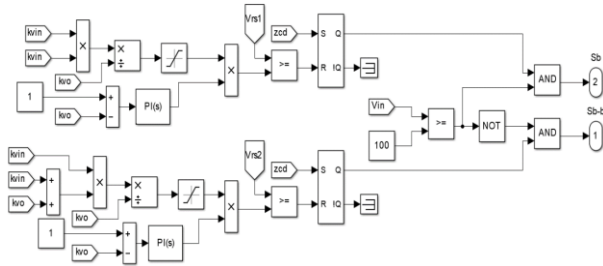
The international current harmonic standard IEC 61000-3-2 applies to equipment using a voltage not less than 220V_{AC} and up to (including) 16 A per phase to limit the emission of harmonic current. Also, IEEE 519 STD standard defines the voltage and current harmonic criteria of the electrical devices. According to this standard, for voltages between 120V-69 kV and currents less than 20 A, the THD of the average current is required to be less than 5%. Therefore, these THD results do not meet either standard.

Moreover, Figure 15 (a) shows the control scheme of the digital VOT controlled buck/buck-boost converter in Matlab/Simulink. Also, Figure 15 (b) shows the digital VOT controller design. It can be seen from the figure that this VOT control scheme is more complex than conventional COT control technique. It should be noted that in both methods, a separate PI controller is designed for the switching elements. Also, unlike the other method, two small

resistors (0.125Ω) are placed at the source pin of the switches to measure the current passing through the switches.



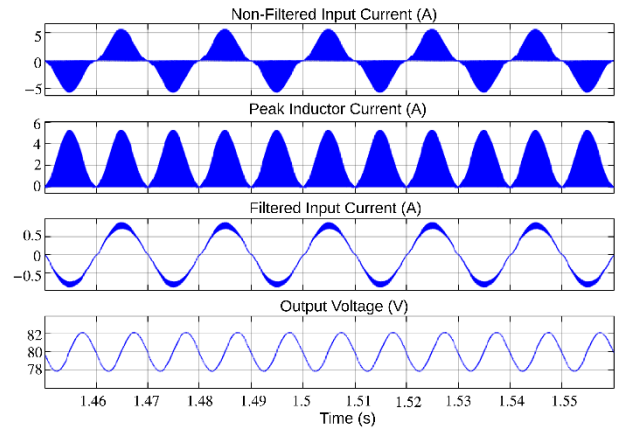
(a)



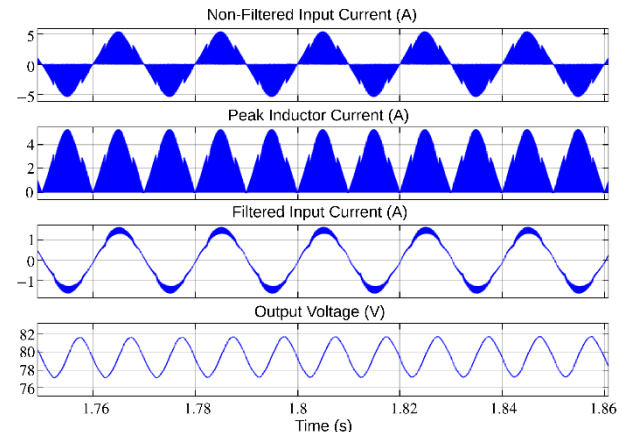
(b)

Figure 15. (a) Control scheme of the digital VOT controlled converter (b) controller design (a) Dijital VOT kontrollü dönüştürücünün kontrol şeması (b) kontrolör dizaynı)

Figure 16 (a) and (b) show the input current, inductor current, filtered input current and output voltage waveforms of the digital VOT controlled buck/buck-boost converter for $220V_{AC}$ and $110V_{AC}$ input voltage scenarios, respectively. As can be seen from the figure, the input current, output voltage and inductor current qualities are better than COT control method.

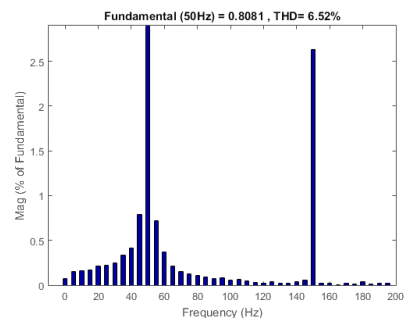


(a)

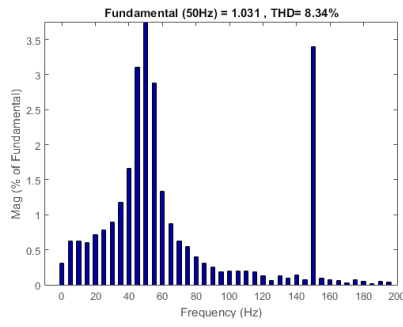


(b)

Figure 16. Input current waveform of the digital VOT controlled buck/buck-boost converter (a) for $220V_{AC}$ input voltage condition (b) for $110V_{AC}$ input voltage condition (Dijital VOT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici dönüştürücünün giriş akım formu (a) $220V_{AC}$ giriş gerilimi koşulu için (b) $110V_{AC}$ giriş gerilimi koşulu için)



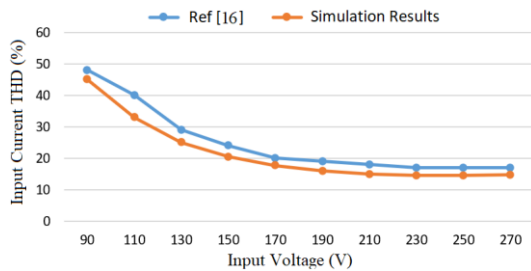
(a)



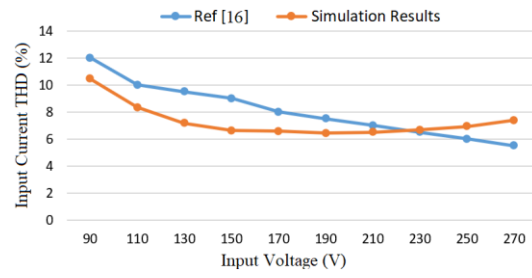
(b)

Figure 17. Input current THD values of the digital VOT controlled buck/buck-boost converter (a) for 220V_{AC} input voltage condition (b) for 110V_{AC} input voltage condition (Dijital VOT kontrollü düşürücü/düşürücü-yükseltici dönüştürücünün giriş akım THD değerleri (a) 220V_{AC} giriş gerilimi koşulu için (b) 110V_{AC} giriş gerilimi koşulu için)

On the other hand, THD simulations using the VOT control method demonstrate superior performance compared to COT. For the 220V_{AC} input voltage condition, the VOT control method achieved a higher PF of 0.99 and a lower THD value of 6.52% as shown in Figure 17 (a). Similarly, for the 110V_{AC} case, the VOT control method exhibited a PF of 0.99 and a THD value of 8.34% as shown in Figure 17 (b). These results highlight the effectiveness of the VOT control method in improving PF and reducing harmonic distortion even if it does not meet the IEEE 519 STD standards. Based on these simulation results, the VOT control method outperforms the COT control method in terms of PF and THD under full load conditions for both 220V_{AC} and 110V_{AC}. These findings indicate the potential advantages of using VOT control in AC-DC PFC converters, providing better efficiency and improved performance in terms of power quality.



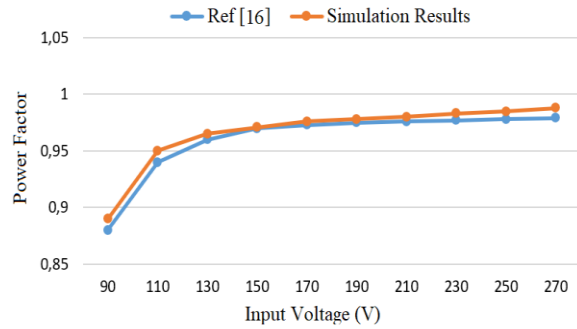
(a)



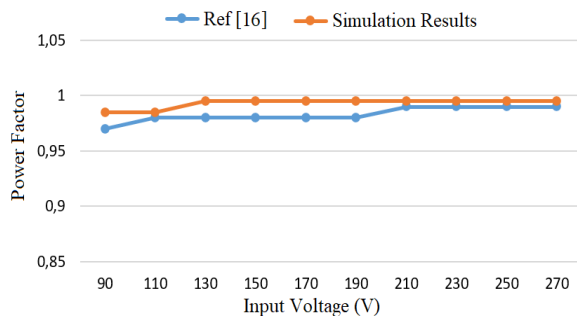
(b)

Figure 18. Input current THD comparison of the topology (a) COT control method (b) VOT control method (Topolojinin giriş gerilim THD karşılaştırması (a) COT kontrol metodu (b) VOT kontrol metodu)

Figure 18 (a) depicts input current THD comparison of the topology with [16] for COT control technique. As can be seen from the figure, data obtained from the simulation studies are compatible with [16]. Also, Figure 18 (b) depicts input current THD comparison of the topology with [16] for VOT control technique. Although it is observed in [16] that THD decreased as the voltage increased, it is observed in this study that THD decreased to a certain level and then increased for VOT control method.



(a)



(b)

Figure 19. PF comparison of the topology (a) COT control method (b) VOT control method (Topolojinin PF karşılaştırması (a) COT kontrol metodu (b) VOT kontrol metodu)

Table 2. Calculated and measured parameters of the COT and VOT control methods (COT ve VOT kontrol metodlarının hesaplanan ve ölçülen parametreleri)

Parameters	COT				VOT			
	110V _{AC}		220V _{AC}		110V _{AC}		220V _{AC}	
	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured
PF	0.95 %	0.95 %	0.98 %	0.98 %	1.00 %	0.98 %	1.00 %	0.99 %
THD	32.45 %	33.26 %	14.21 %	14.69 %	7.95 %	8.34 %	6.17 %	6.52 %
$V_{oripple}$	3.45V	3.50V	3.74V	3.85V	4.10V	4.15V	4.10V	4.17V
I_{Lpeak}	5.8A	5.9A	4.6A	4.8A	5.0A	5.3A	5.0A	5.4A

Figure 19 (a) gives the PF comparison of the topology with [16] for COT control method. Also, Figure 19 (b) gives the PF comparison of the topology with [16] for VOT control method. According to the figure, data obtained from both simulation studies are compatible with [16]. Finally, calculated and measured parameters of the implemented methods are listed in Table 3. According to the table, calculated and measured parameters are compatible with each other.

6. CONCLUSION (SONUÇ)

In this study, a comparative analysis of two control techniques, COT and VOT, for fully digitally controlled CRM buck/buck-boost converter is implemented. The objective is to evaluate and compare the performance of these control strategies in terms of THD and PF.

The results obtained from the simulations performed in the Matlab/Simulink software platform revealed that the VOT control technique outperforms the COT control technique in terms of THD and PF under steady-state conditions. The VOT control method demonstrated higher PF values and lower THD compared to the COT control approach for both 220V_{AC} and 110V_{AC} input voltage under full load conditions.

The results of this paper ensure valuable insights into strengths and limitations of each control technique. The VOT control strategy offers the advantage of dynamic adaptation of the on-time period based on input and output voltage conditions, resulting in improved load regulation and stability. These benefits make it a suitable choice for AC-DC PFC converters in applications that require high PF and low THD.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

Bu makalenin yazarı, çalışmasındaki materyal ve yöntemlerin etik kurul onayı ve/veya yasal izin gerektirmediğini beyan eder.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Zafer ORTATEPE: He conducted the research, analyzed the results and performed the writing process.

Araştırmayı 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] Baek J, Kim JK, Lee JB, Park MH, Moon GW. A New Standby Structure Integrated with Boost PFC Converter for Server Power Supply. IEEE Trans Power Electron. 2019; 34(6): 5283–5293.
- [2] Zhao B, Abramovitz A, Smedley K. Family of Bridgeless Buck-Boost PFC Rectifiers. IEEE Trans Power Electron. 2015; 30(12): 6524–6527.
- [3] Yang HT, Chiang HW, Chen CY. Implementation of Bridgeless Cuk Power Factor Corrector With Positive Output

- Voltage. *IEEE Trans Ind Appl.* 2015; 51(4): 3325–3333.
- [4] Mahdavi M, Farzanehfard H. Bridgeless SEPIC PFC rectifier with reduced components and conduction losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2011; 58(9): 4153–4160.
- [5] Yang J, Wu X, Zhang J, Qian Z. Design considerations of a high efficiency ZVS buck AC-DC converter with constant on-time control. *International Telecommunications Energy Conference (Proceedings).* 2010.
- [6] Yang J, Wu X, Zhang J, Qian Z. Variable on-time controlled ZVS buck PFC converter for HB-LED application. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC.* 2011.
- [7] Wu X, Yang J, Zhang J, Xu M. Design considerations of soft-switched buck PFC converter with constant on-time (COT) control. *IEEE Trans Power Electron.* 2011; 26(11): 3144–3152.
- [8] Xie X, Zhao C, Zheng L, Liu S. An improved buck PFC converter with high power factor. *IEEE Trans Power Electron.* 2013; 28(5): 2277–2284.
- [9] Yan T, Xu J, Zhang F, Sha J, Dong Z. Variable-on-time-controlled critical-conduction-mode flyback PFC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2014; 61(11): 6091–6099.
- [10] Wu H, Zhang Y, Zhao M, Shen H, Wu X. A constant-on-time based buck controller with active PFC for universal input LED system. *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems.* 2015.
- [11] Divya Prabha M V., Seema PN. A novel topology of forward-flyback PFC converter with constant on-time control. *Proceedings of IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy, TAP Energy.* 2015.
- [12] Wang X, Yao K, Zhang J. Reducing the switching frequency variation range for CRM buck PFC converter by variable on-time control. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC.* 2016.
- [13] Zhao C, Zhang J, Wu X. An improved variable on-time control strategy for a CRM flyback PFC converter. *IEEE Trans Power Electron.* 2017; 32(2): 915–919.
- [14] Memon AH, Yao K, Chen Q, Guo J, Hu W. Variable-On-Time Control to Achieve High Input Power Factor for a CRM-Integrated Buck-Flyback PFC Converter. *IEEE Trans Power Electron.* 2017; 32(7): 5312–5322.
- [15] Lin HC, Chu WM, Tsai CH, Su WC. A digitally variable on-time controlled PFC flyback converter with primary-side regulation. *Proceedings - 7th International Symposium on Next-Generation Electronics.* 2018.
- [16] Memon AH, Baloach MH, Sahito AA, Soomro AM, Memon ZA. Achieving High Input PF for CRM Buck-Buck/Boost PFC Converter. *IEEE Access.* 2018; 6: 79082–79093.
- [17] Chen J, Yao K, Fang B, Li L, Guan C, Wu C, et al. Segmented Constant-On-Time Control Method for CRM Buck-Buck/Boost PFC Converter. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).* 2019.
- [18] Yao K, Tang H, Ma C, Wu C. Constant Switching Frequency Control for CRM Buck PFC Converter. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron.* 2020; 8(4): 4223–4234.
- [19] Yao K, Wu C, Chen J, Yang J, Li J, Jin Z, et al. A Scheme to Improve Power Factor and Dynamic Response Performance for CRM/DCM Buck-Buck/Boost PFC Converter. *IEEE Trans Power Electron.* 2021; 36(2): 1828–1843.
- [20] Liu X, Wan Y, He M, Zhou Q, Meng X. Buck-Type Single-Switch Integrated PFC Converter with Low Total Harmonic Distortion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2021; 68(8): 6859–6870.
- [21] Sahlabadi F, Yazdani MR, Faiz J, Adib E. Resonant Bridgeless Buck PFC Converter With Reduced Components and Dead Angle Elimination. *IEEE Trans Power Electron.* 2022; 37(8): 9515–9523.
- [22] Khalili R, Adib E. Soft-Switching Bridgeless Buck PFC With Low THD. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2023; 70(12): 12211–12218.

Hydrogen Production using a Hybrid System Built with Renewable Energy Resources in Yenice

Esra BAYIR¹  Halil Hakan AÇIKEL^{1*} 

¹Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 12/12/2023
Accepted: 17/12/2023

Keywords

HOMER
Zero Emission
Optimization
Hybrid Renewable Energy
System
Hydrogen Storage

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 12/12/2023
Kabul: 17/12/2023

Anahtar Kelimeler

HOMER
Sıfır Emisyon
Optimizasyon
Hibrit Yenilenebilir Enerji
Sistemi
Hidrojen Depolama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The hybrid system with electrical energy requirements was simulated using HOMER Pro software. A generator, wind turbine, solar panel, hydrogen tank, electric inverter, and battery system are components of the hybrid energy system. /HOMER Pro yazılımı kullanılarak elektrik enerjisi ihtiyacına sahip hibrit sistemi simüle edilmiştir. Jeneratör, rüzgar türbini, güneş paneli, hidrojen tankı, elektrik invertörü ve akü sistemi hibrit enerji sisteminin bileşenleridir.

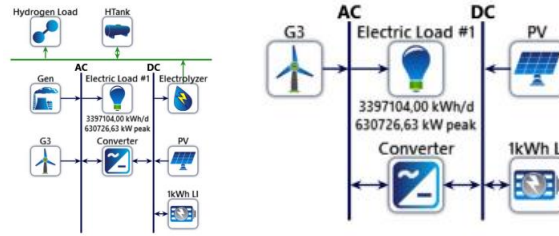


Figure A: The system designed in the specified areakarabük province /**Şekil A:** Belirlenen alanda tasarlanan sistem bilgileri

Highlights (Önemli noktalar)

- The percentage of renewable energy used was taken into consideration while evaluating energy prices and environmental harm. / Enerji fiyatları ve çevreye verilen zarar değerlendirilirken yenilenebilir enerjinin kullanım yüzdesi dikkate alınmıştır.
- August, September, and October seemed to be the months when the 500 kg hydrogen tank was fully loaded. / Ağustos, Eylül ve Ekim ayları 500 kg'lık hidrojen tankının tam dolu olduğu aylar olduğu görülmüştür.
- According to the investigation, altering the MNR Ratio boosts the hydrogen tank's filling capacity. / Yapılan araştırmaya göre MNR Oranının değiştirilmesi hidrojen tankının doluluk kapasitesini arttırmıştır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the production of hydrogen in electrical loads at different renewable energy rates. / Bu çalışmanın amacı, farklı yenilenebilir enerji oranlarında elektrik yüklerinde hidrojen üretimini araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): The originality of this study is to investigate hydrogen production, environmental impacts and cost analysis with hybrid energy system optimization for the determined region. / Bu çalışmanın özgünlüğü, belirlenen bölge için hibrit enerji sistemi optimizasyonu ile hidrojen üretimi, çevresel etkiler ve maliyet analizini araştırmaktır.

Results (Bulgular): When the renewable energy rate was 100%, there was an increase in the unit energy cost while the damage to the environment could not be detected. When the occupancy rate of the hydrogen tank capacity was checked, it was observed that the occupancy rate was high when the hydrogen load was low, and there were fluctuations in the occupancy rate when the hydrogen load was high. / Yenilenebilir enerji oranı %100 olduğunda çevreye verdiği zarar bulunamazken birim enerji maliyetinde artış olmuştur. Hidrojen tankı kapasitesinin doluluk oranı kontrol edildiğinde hidrojen yükü az olduğunda doluluk oranının yüksek olduğu, hidrojen yükü fazla olduğunda ise doluluk oranında dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): In this study, the optimum hybrid system was investigated to meet the energy demand of Yenice district of Karabük province and to investigate hydrogen production. When the results of all system simulations are evaluated, although the use of 95% renewable energy sources causes an increase in the unit energy cost and net current cost, the impact of environmental damage has decreased. / Bu çalışmada Karabük ili Yenice ilçesinin enerji talebini karşılamak ve hidrojen üretimini araştırmak amacıyla optimum hibrit sistem araştırılmıştır. Tüm sistem simülasyonlarının sonuçları değerlendirildiğinde, %95 yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı birim enerji maliyetinde ve net bugünkü maliyette artışa neden olsa da, çevreye verilen zararın etkisi azalmıştır.



Hydrogen Production using a Hybrid System Built with Renewable Energy Resources in Yenice

Esra BAYIR¹ Halil Hakan AÇIKEL^{1*}

¹Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 12/12/2023
Accepted: 17/12/2023

Keywords

HOMER
Zero Emission
Optimization
Hybrid Renewable Energy
System
Hydrogen Storage

Abstract

Renewable energy demand such as solar, wind, biomass, and geothermal, which are the least harmful to nature and natural life, has increased due to the depletion of fossil fuels used in energy production and the greenhouse gases they have released to the environment. Thus, with the inclusion of renewable energy sources in the system, a rich structure in terms of energy diversity has emerged. A region simulating a hybrid system with an annual average electrical energy need of 3997104 kWh/day was selected using HOMER Pro software. Solar radiation and wind data belonging to the region were taken from NASA Surface. The hybrid energy system consisted of a generator, wind turbine, solar panel, hydrogen tank, electrifier inverter, and battery system. The energy produced by the resulting system was used by 11.26 kg/day hydrogen load and 3997104 kWh/day electrical load. The economic evaluation criteria of the hybrid energy system were the cost of energy production, the net present value (NPC), and the payback period. The environmental evaluation criteria were determined as the renewable energy rate and emission values. When the renewable energy rate was at the lowest level, the most economical system was the Gen/PV/WT/Bat/300Htank/Hloaded hybrid system when emissions were not considered, while the Gen/PV/WT/Bat hybrid system had the lowest emissions without considering the cost. When the renewable energy rate was higher, the most economical system was the PV/WT/Bat hybrid system when emissions were not considered.

Yenice'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Kurulan Hibrit Sistemle Hidrojen Üretimi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 12/12/2023
Kabul: 17/12/2023

Anahtar Kelimeler

HOMER
Sıfır Emisyon
Optimizasyon
Hibrit Yenilenebilir Enerji
Sistemi
Hidrojen Depolama

Öz

Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye saldıkları sera gazları nedeniyle doğaya ve doğal hayata en az zarar veren güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal gibi yenilenebilir enerjilere olan talep artmıştır. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme dahil edilmesiyle enerji çeşitliliği açısından zengin bir yapı ortaya çıkmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak yıllık ortalama 3997104 kWh/gün elektrik enerjisi ihtiyacına sahip hibrit sistemi simüle eden bir bölge seçilmiştir. Bölgeye ait güneş radyasyonu ve rüzgar verileri NASA Surface'tan alınmıştır. Hibrit enerji sistemi; jeneratör, rüzgar türbini, güneş paneli, hidrojen tankı, elektrikli invertör ve akü sisteminden oluşmaktadır. Ortaya çıkan sistemin ürettiği enerji, 11,26 kg/gün hidrojen yükü ve 3997104 kWh/gün elektrik yükü ile kullanılmıştır. Hibrit enerji sisteminin ekonomik değerlendirme kriterleri, enerji üretiminin maliyeti, net bugünkü değer (NPC) ve geri ödeme süresiydi. Çevresel değerlendirme kriterleri yenilenebilir enerji oranı ve emisyon değerleri olarak belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji oranının en düşük seviyede olduğu dönemde emisyonlar dikkate alınmadığında en ekonomik sistem Gen/PV/WT/Bat/300Htank/Hyükü hibrit sistem olurken, en düşük değere sahip sistem ise Gen/PV/WT/Bat hibrit sistemi olmuştur. Yenilenebilir enerji oranının yüksek olduğu oranda emisyonlar dikkate alınmadığında en ekonomik sistem PV/WT/Bat hibrit sistemi olmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Key and keyseat Due to the conditions of the Covid-19 pandemic, the increasing population has tended to rural areas. Thus, as a result of the increasing population and energy demand in rural areas, the need for renewable energy sources has increased.

According to these needs, it is important to deploy the systems closest to the location when it comes to energy production, energy access, cost, and efficiency in certain regions and rural areas [1]. In this regard, the efficient use of hybrid renewable energy systems is in question in line with the uninterrupted energy need for using

environmentally friendly energy systems [2, 3, 4]. Hybrid systems provide the highest production efficiency [5]. It can provide the maximum energy from wind and solar energy [6, 7]. Dursun [8] examined renewable energy sources in terms of energy demand, optimization, economic evaluation, design criteria, and greenhouse gas emissions in rural areas as off-grid system. This research was carried out using the National Renewable Energy Laboratory's HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) software [9, 10]. While solar, wind, and diesel generators were included in the system; energy production, cost, emission, and optimum design were evaluated by adding a storage system.

Sustainable energy systems are crucial in light of the recent trend toward rural areas [11]. The use of renewable energy sources (RES) in the energy sector promotes sustainable and environmentally friendly energy production [12]. To be an uninterrupted power supply in hybrid systems, a battery system that provides sufficient conditions is added to the solar and wind energy systems [13]. It is predicted that the energy demand in developing countries such as Turkey will increase day by day [14]. Turkey is moving towards increasing its renewable energy resources in order not to pose any difficulties in terms of energy continuity [15-17]. Even if there are discontinuous and high-cost systems, they become popular because of their availability, technology, and features [18-19]. For such reasons, optimal sizing and developed software are used because they are low-cost, easy to access, and problem-solving systems [20-22]. In a comparison of wind turbine and diesel water pumping systems in the north-central Anatolia region of Turkey, Sinop was determined as the most cost-effective electricity generation as various wind energy conversion systems reduce costs [23].

HOMER Pro software performs an economic analysis of a system while estimating its technical feasibility. Then, it sorts the systems according to NPC and optimizes them to minimize COE and better NPC [24]. In addition, when software systems meet, HOMER Pro has optimum system design and high usage capacity [25]. Although off-grid or on-grid systems were examined in the studies, the aim of them was to achieve cost-effective energy production with simulation and optimization methods. [26-28]. When the grid is 44 km away from the reserve and an off-grid system analysis is evaluated, it is known that the off-grid system is cheaper and will provide maximum benefit with 2-stage emission trading [29, 30].

For a village located in a rural area, a PV-Wind-Generator-Battery system was installed, and the NPC cost for 176 kWh/day electric loads was obtained as 168,378 \$ and the COE cost was 0.173 \$/kWh [31]. It showed that a system with a 99% renewable energy rate used in a PV-Wind combination in a rural area in Kenya reduced the energy cost from 0.594 \$/kWh to 0.585 \$/kWh [32]. In Iran, the COE cost was found to be \$0.107/kWh in the optimum off-grid PV-Wind-BG-DG-Battery system according to different geographical and climatic conditions [33]. In a study conducted in Bangladesh, in the PV-BG-DG-Battery system, NPC was 1.28 million \$, COE was 0.2 \$ / kWh for 1108.5 kWh/day energy demand, while NPC was 357284 \$ and COE was 0.370 \$ / kWh in the PV-DG-Battery system [34, 35]. NPC and COE cost was \$2,087 and \$0.362 respectively when installing a PV-WT hybrid system for 770 homes in India [36, 37]. In Taleghan-Iran, the energy cost of the energy system with 0.8 kW using the PV-Wind-Battery system was \$1,655/kWh, the initial investment cost was \$22998, and the net current cost (NPC) was \$24623 [38]. In addition to being the most economical energy source in a study for the Hydro /Battery system, it had the lowest net current cost (NPC) of \$162,987 and an energy cost (COE) of 0.111 kWh among all other system configurations [39]. The Homer Pro software finds the most suitable results with the optimization and simulation technique of the energy production of the on-grid and off-grid renewable energy systems [40,41]. In addition to the low efficiency of the electricity-hydrogen-electricity conversion, and the high cost of electrolysis and fuel cells, it has been concluded that hydrogen energy is not sufficient in terms of the economy [24-26]. Moreover, in new studies, the comprehensive feasibility of renewable energy systems is performed using site selection, Geographic Information Systems (GIS), and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) in Turkey [42-43]. The hybrid system in the Eskipazar district in Karabük, where fuel consumption has decreased by 28-43% with the in change renewable energy rates, has emerged as a result of the study [44].

According to all research, using hybrid renewable energy systems (HRES) has become widespread especially in developing countries due to optimum sizing. Especially in rural areas, the simulation has been made in the form of off-grid systems. The use of solar panels is generally found in every study. HRESs are widely used in rural, remote, and private areas independent of the grid. The most uncertain parameters in the HOMER Pro system are wind speed, solar radiation, fuel price, component cost,

and primary load, and this variation is thought to vary by country, climate, and geography.

Arslan et al. [45] advised a 150-megawatt coal-fired power plant that recovers waste heat for electricity generation, hot water, and hydrogen production. To achieve hydrogen generation, a high-temperature electrolyzer was incorporated into the current system. As current density increases, the study's findings indicate that less hydrogen is produced.

In this study, different from this study [44] and the literature, different hydrogen load and hydrogen production was investigated in the Yenice district in Karabük.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, renewable energy systems were evaluated in terms of design, sizing, and emission values in the Yenice district of Karabük province. The average consumption values of Karabük province were taken from the Turkish Statistical Institute (TUIK) [46], and a renewable energy system designed to provide off-grid energy demand was simulated in HOMER. One of the biggest advantages of hybrid systems in energy production is the use of battery technology together with renewable energy systems to meet energy demands according to changing climatic conditions and to provide uninterrupted power. There is commercial software that analyzes energy demands with renewable energy systems according to location information. Components, resources, sizing, technical-environmental analysis, emissions data, and system controls are a few of them. When the parameters are examined in detail, HOMER Pro was chosen as the most effective and efficient. The HOMER Pro program, which performs analysis for both grid-connected systems and off-grid systems, was developed by NREL (National Renewable Energy Laboratory) to optimize the project design model and evaluate the sensitivity, as well as select the most applicable hybrid system model based on emission values and cost.

In the designed system, solar panels, a hydrogen tank, a hydrogen load, an electrical load, a wind turbine, a converter, a generator, and battery systems were installed in different ways. They were designed as complementary to each other to be uninterrupted. The power sources in the HOMER Pro program are PV, wind turbine, generator, power grid, hydropower, biomass, and fuel cell. In this study, a hydrogen tank, an electrolyzer, solar panels, a wind turbine, and a generator were used as the

power source. While there are a flywheel, a battery, and hydrogen systems in the storage systems in HOMER Pro, batteries were preferred in the design. While seasonally variable daily profiles and thermal loads were present in HOMER Pro, daily profile load was preferred.

In the specified system, Carbon Dioxide (CO₂), Carbon monoxide (CO), Unburned hydrocarbons (UHC), Particulate matter (PM), Sulfur Dioxide (SO₂), Nitrous Oxide (NO_x) are determined as polluting factors, and limits are set according to these factors and penalties are set. The causes of these pollutants are determined by the use of generators in energy production, boilers in thermal energy production, and grid electricity

Karabük province, which has an area of 4145 km² and is located in the Western Black Sea Region of Turkey, is located between 40° 57' and 41°34' north latitudes and 32° 04' and 33° 06' east longitudes. The analyzed district of Yenice is located at 41°15.7' north latitude and 32°16.8' east longitude. Yenice, which is 33 km away from the city center of Karabük and has a surface area of 1150 km², has the characteristic features of the Western Black Sea Region in terms of land structure, has fertile forests of 85% of its surface area and does not contain flat and plain areas. The fact that it contains a significant diversity in terms of nature and natural life reminds the importance of protecting this life.

The geographical location of the Yenice district of Karabük province is shown in Figure 1. There are areas where renewable energy systems can be installed in the Yenice region. At the same time, due to the high wind potential, it is a suitable region for the placement of wind turbines. In addition to renewable energy systems, it is a suitable region for the addition of a hydrogen energy system. The data providing all energy consumption has been taken from the Turkish Statistical Institute. According to these data, total energy consumption in 2020 was 1,750,346 MWh/year.

2.1. Renewable Energy Potential of the Analysis

Area (Analiz Alanının Yenilenebilir Enerji Potansiyeli)

When it comes to hybrid renewable energy systems, the first thing that comes to mind is solar energy and wind energy. In this study, the data on the official website of the Ministry of Energy and Natural Resources of the Republic of Turkey was used for the solar and wind data for the district determined. Since Yenice district of Karabük province is in the North of Turkey, the annual average wind speed is between 1.46 m/s and 6.27 m/s at 100 meters altitude, and the annual average wind power density

is between 6.533 (W/m^2) and 347.868 (W) at 100 meters. The capacity factor calculated with the technical values of a 3 MW wind turbine at 100 meters varies between 31.7% and 0.59%. Images of all these data are shown in Figure 2.

kWh/m^2 . At the same time, the Global radiation value varies between 1.24-6.08 kWh/m^2 -day and the sunshine duration varies between 3.02-10.58 hours. Figure 3 depicts the visuals of all of these data for Karabük province, as well as the solar energy atlas.

Considering the solar energy data, it is seen that the annual solar radiation is between 1400-1500

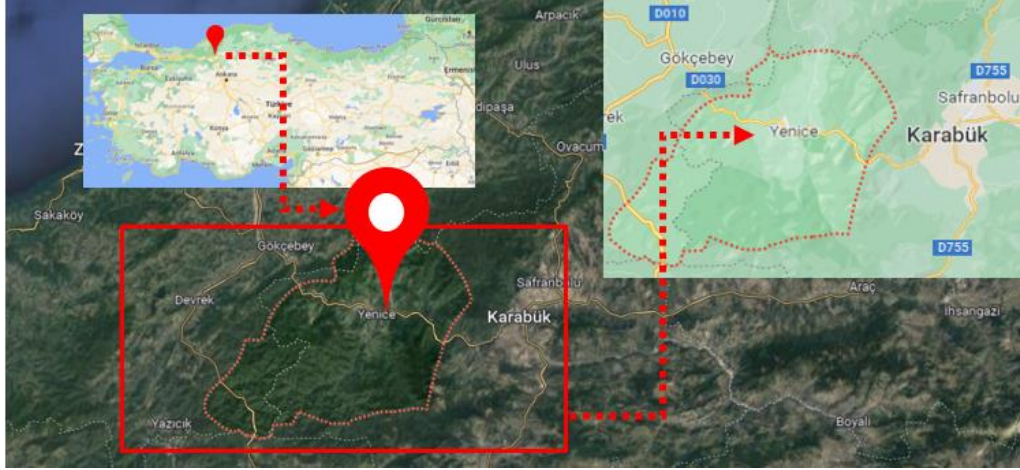


Figure 1. Geographical information of Yenice district of Karabük province (Karabük ili Yenice ilçesi coğrafi bilgileri)

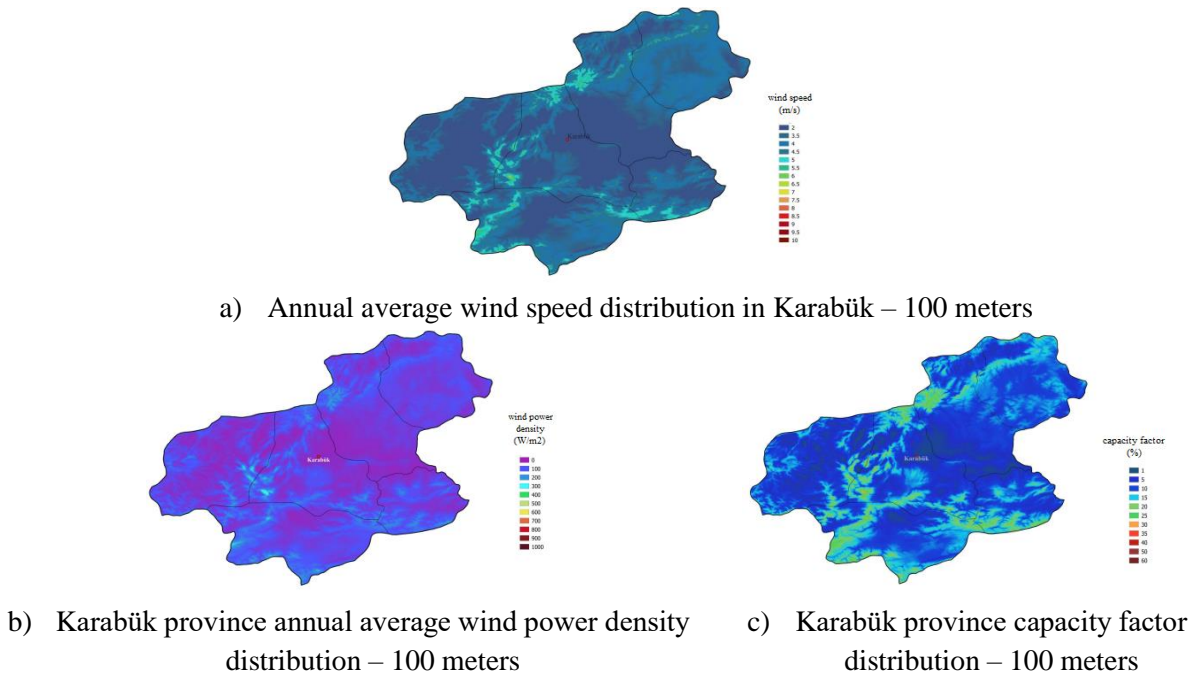


Figure 2. Karabük province wind energy atlas [47] (Karabük ili rüzgar enerjisi atlası)

2.2. Parameters in system design (Sistem Tasarımındaki Parametreler)

In this study, different system components such as solar panels, electrolyzers, wind turbines, diesel generators, electric and hydrogen loads, batteries, hydrogen tanks, and converters were used as shown in Figure 4. It was independently analyzed without restrictions to meet the annual load of 3,397,104 kWh/day modeled with HOMER Pro. The system that provides the energy demand was analyzed

using different renewable energy rates for the most cost-effective and environmentally friendly system design. It was aimed for the designed systems to have a high rate of renewable energy sources and have low emissions. Many different renewable energy systems have been designed for the region determined in this study. As shown in Figure 4, systems are designed using certain components such as generators, wind turbines, solar panels, converters, batteries, electrolyzers, and hydrogen

tanks. The modeled electrical load of the different designed systems was determined as 1000kWh/day and 3.997.104.00 kWh/day, and a peak load of 630726.63 kW was determined. To obtain a hybrid system design that provides this determined load, scenarios with different renewable energy rates

(MiNimum Renewable fraction-MNR) have been produced and examined economically, environmentally, and technically. Information about the electric load and hydrogen load added to the system is shown in Figure 5 and Figure 6.

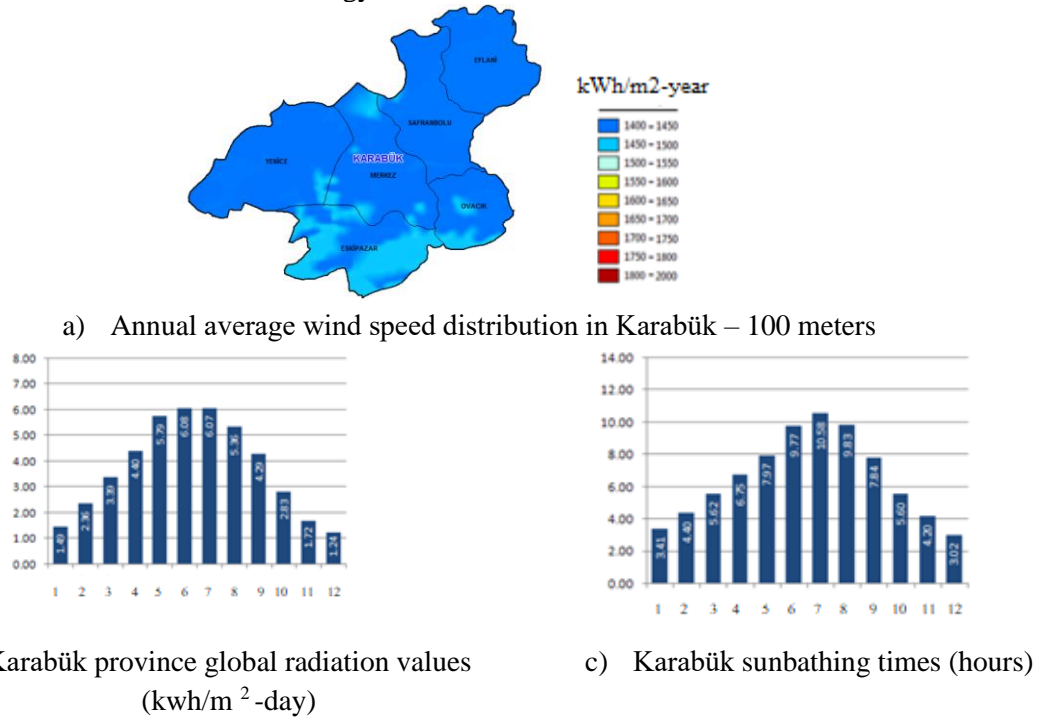


Figure 3. Karabük province solar energy atlas [48] (Karabük ili güneş enerjisi atlası)

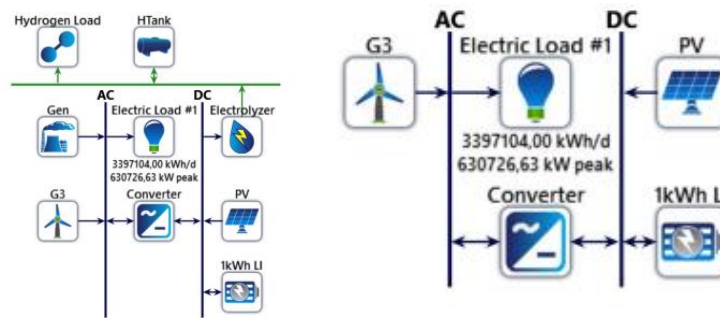


Figure 4. The system designed in the specified area Karabük province (Belirlenen Alanda Tasarlanan Sistem Bilgileri)

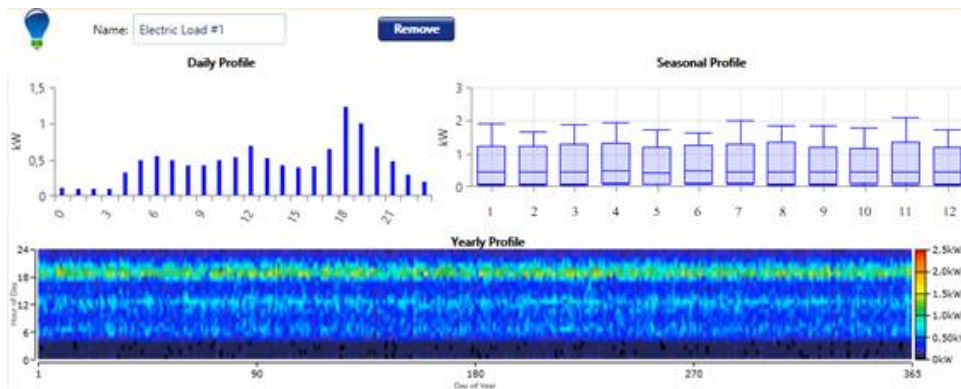


Figure 5. Electricity Load Information of Yenice District (Yenice ilçesi elektrik yük bilgileri)

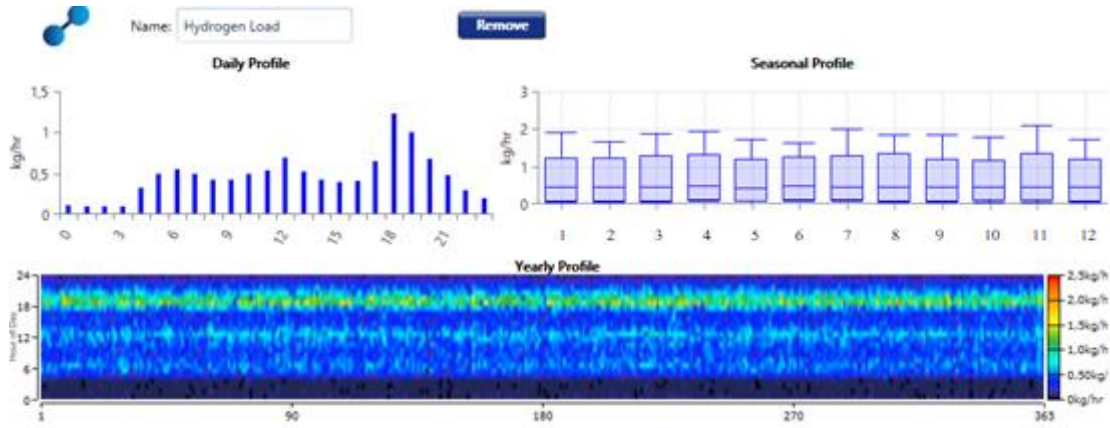


Figure 6. Yenice district hydrogen load information (Yenice ilçesi hidrojen yükü bilgisi)

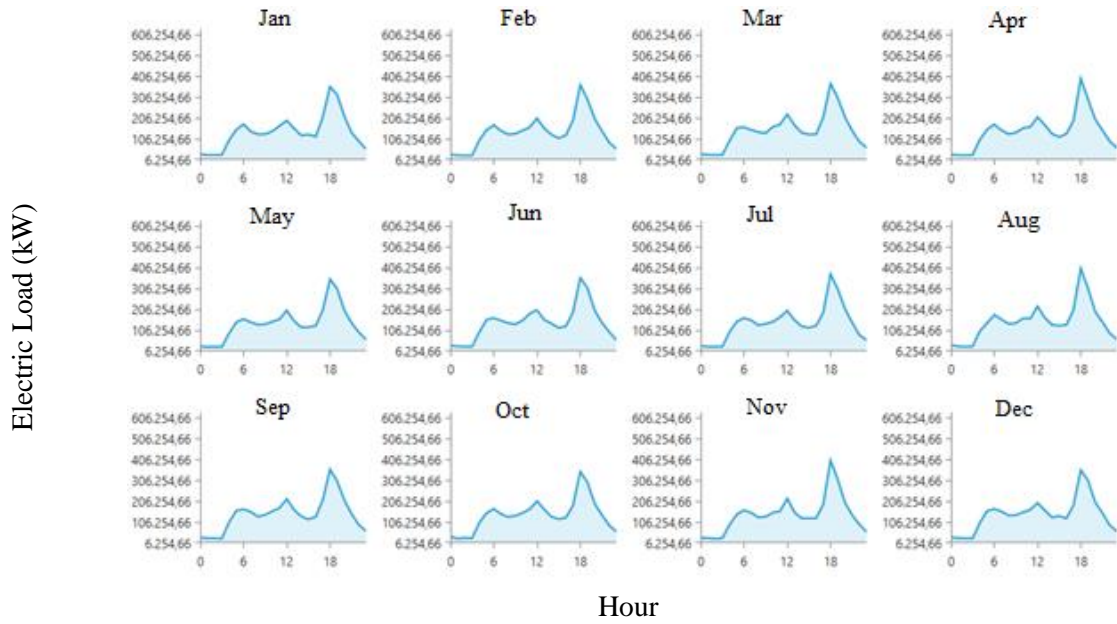


Figure 7. Daily electric load profile (Günlük elektrik yük profili)

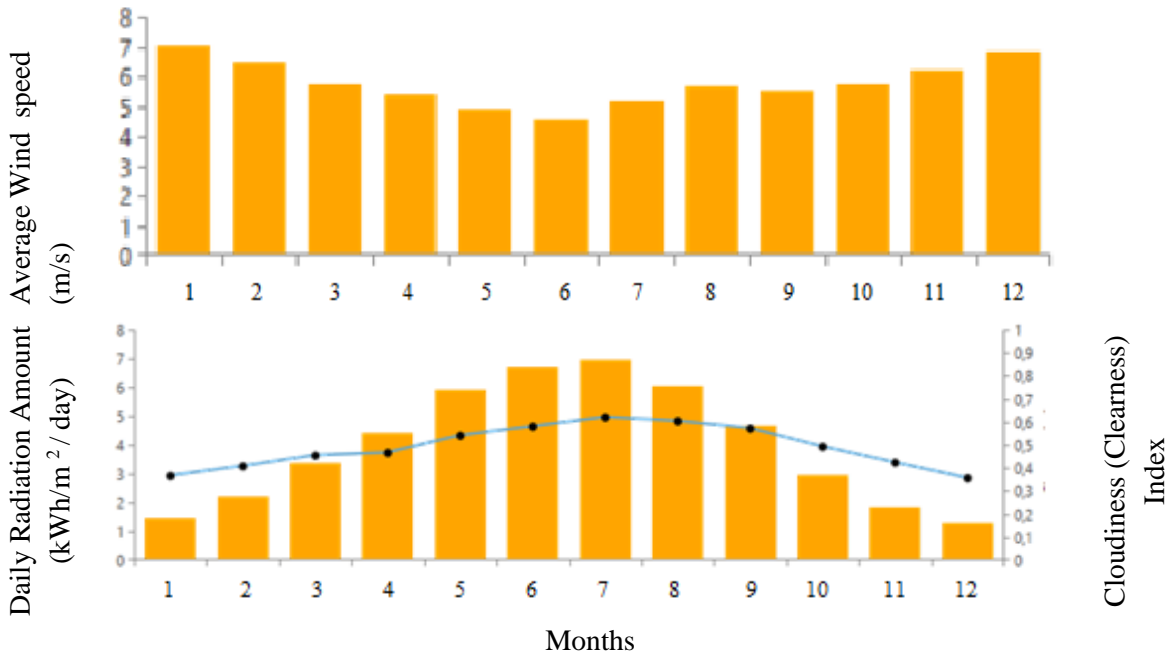


Figure 8. Monthly average wind speed, daily radiation amount, and temperature values (Aylık ortalama rüzgar hızı, günlük radyasyon miktarı ve sıcaklık değerleri)



Figure 8. Continued (Devamı)

The graphs of the hourly data of the electrical load classified according to the months are shown in Figure 7. When these graphs were analyzed based on all months, it was observed that the period in which the electrical load was consumed the most was between 5:00 and 8:00 p.m., and the period in which the electricity load was consumed the least was between 11:00 p.m. and 04:00 a.m.

While the average wind speed in the Yenice district of Karabük was 5.77 m/s, the month with the lowest wind speed was June, while the month with the highest wind speed was January. When the solar energy potential was examined as seen in Figure 8, the average daily amount of radiation was 3.99 kWh/m²/day, with 6.97 kWh/m²/day being the highest in July, while with 1,280 kWh/m²/day being the last December. While the cloudiness was mostly seen in July, it was less in December. As the cloudiness index decreases, electricity production from solar energy decreases.

When the temperature values were checked, the average value was 11.79 °C, while August was the hottest month and January was the lowest month. All this information was taken from Homer Pro NASA Surface Meteorology and Solar Energy Database. This information is averaged using the values between the years 1983 and 2005.

3. RESULTS (BULGULAR)

While NPC can be reduced to minimum levels by solving optimization problems in all system designs, the lowest cost, zero-emission generation, and energy production costs can vary. For this reason, while solving an optimization problem, the constraints and decision variables that affect the solution may differ. When it comes to accuracy in the solution, it is complicated due to the nonlinearity of the equipment that makes up the system. However, in such systems, the most appropriate decision of a system to be established is reached by correctly determining the decision variables and the effect of constraints on the cost. Energy analysis of the hybrid system consisting of a generator, a wind

turbine, a solar panel, a battery, a hydrogen tank, an electricity load and hydrogen load for the Yenice district of Karabük province was modeled using HOMER PRO software. The analysis was made by increasing the percentage of renewable energy use for the selected location. Renewable energy rates of 0 %, 10%, 25%, 50%, 60%, 75%, 90%, 95%, and 100% were used. The results of the analysis with various hybrid system components and graphs of the net present cost and the unit energy cost were shown in Figure 9 and Figure 10.

For the simulated location, 7 different hybrid systems were designed and 63 case studies with 9 different renewable energy rates were conducted. HOMER Pro gave the greenhouse gases (such as carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide, unburned hydrocarbons, particulate matter and consumed fuel values) released as a result of the simulation in the final report. The damage caused by these reports to the environment was shown in Figure 11, Figure 12 and Figure 13.

The use of fossil fuels in energy production causes serious damage in terms of greenhouse gas emissions released to the environment. The amount of fuel used to meet the energy demand according to the different renewable energy ratios of the systems modeled in this study was given in Figure 11. In the Gen-PV-WT-Bat-Elec-300Htank-H-loaded system designed in Yenice district, 232.742.487 litres of fuel were used in the case of 0% renewable energy sources, while there was a fuel consumption of 152.223.144 litres when the renewable energy rate was 50%. Despite these fuel consumptions, when it had a 95% renewable energy rate, there was a fuel consumption of 17.025.145 litres.

In the case of 100% renewable energy rate, any damage to the environment did not appear to be shown in Figure 12 and Figure 13. The system that caused the most damage to the environment raised when it came to the use of renewable energy sources without any rates. When the renewable energy rate of the system called Gen-PV-WT-Bat-Elec-

300Htank-Hload was 95%, it was observed that the amount of carbon dioxide decreased from 622,318.27 tons/year to 44,565.27 tons/year, according to the simulations made for Yenice district. For the same location, the amount of carbon monoxide for the Gen-PV-Bat system was 3962.09 tons/year, while the amount of carbon monoxide was 280,92 tons/year when 95% renewable energy rate was used.

System designs were examined in the case where the renewable energy ratio of the hydrogen load

changing for two different electrical loads is 60 % and 95%. According to the results made in this context, it has been observed that the unit energy cost increases in case of a high electrical load, and at the same time, the unit energy cost of 60% renewable energy is lower in case of the same hydrogen load. The cost analysis of the change according to the MNR Ratio corresponding to the variable hydrogen load for the 3997104 kWh/day electrically loaded system is shown in Figure 14, and the cost variation of the 1000 kWh/day electrically loaded system is shown in Figure 15.

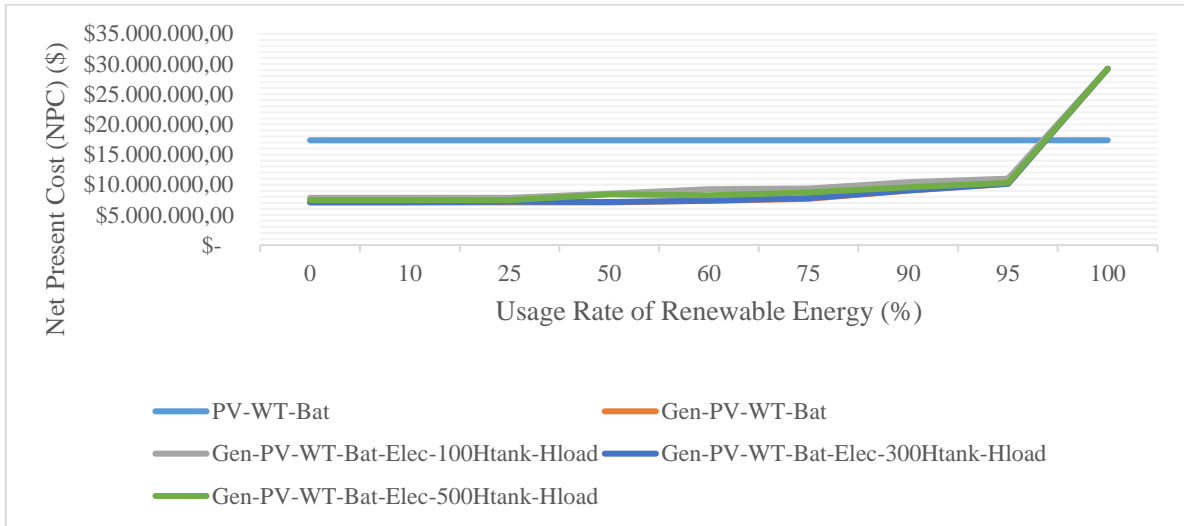


Figure 9. Net present costs scaled by renewable energy ratio (1/1000) (Yenilenebilir enerji oranına göre ölçeklendirilmiş net bugünkü maliyetler)

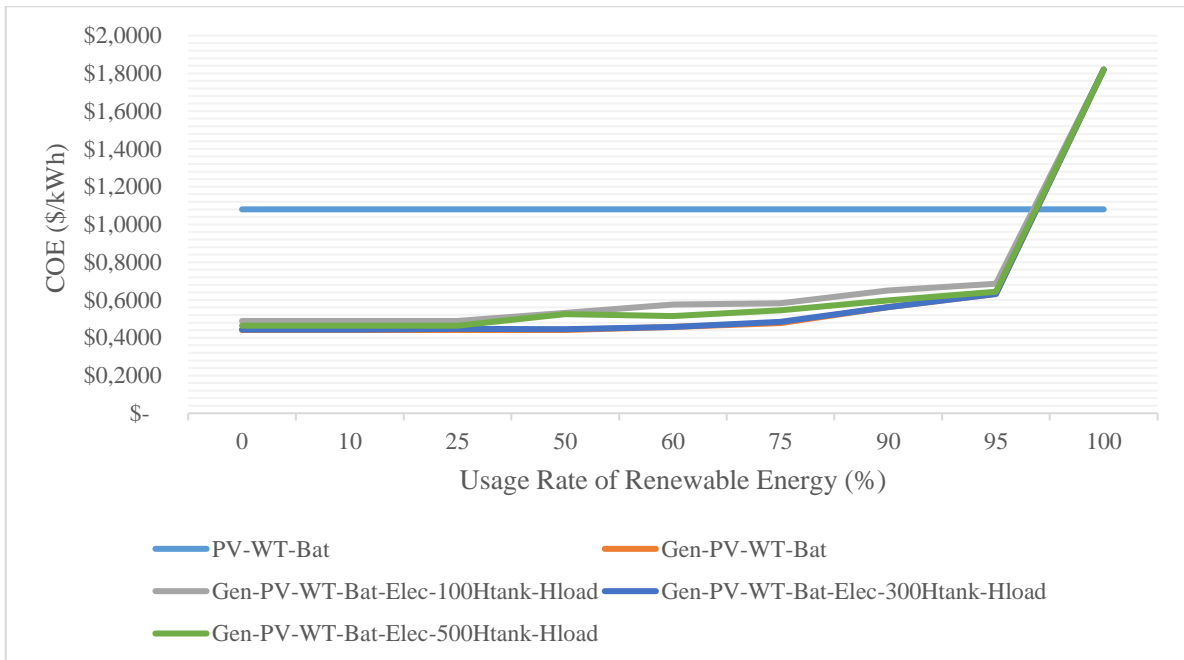


Figure 10. Unit cost of renewable energy by energy ratio (\$/kwh) (Yenilenebilir enerjinin enerji oranına göre birim maliyeti)

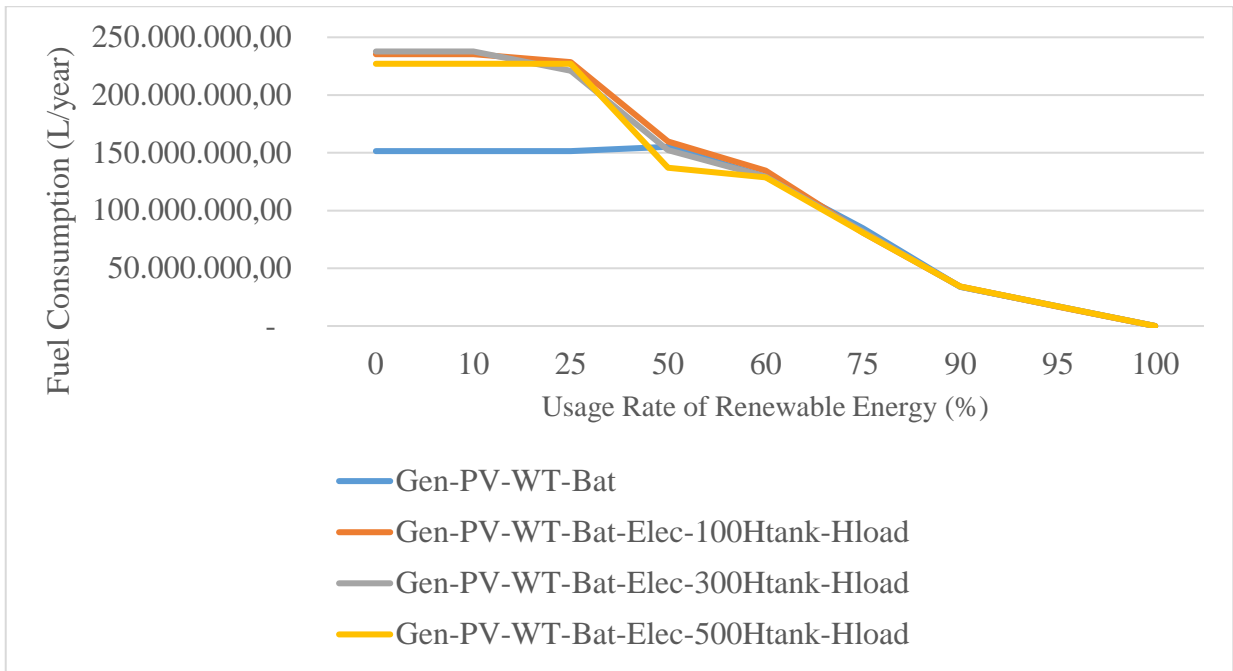


Figure 11. Comparison of fuel consumption of hybrid systems by renewable energy ratio (Hibrit sistemlerin yakıt tüketiminin yenilenebilir enerji oranına göre karşılaştırılması)

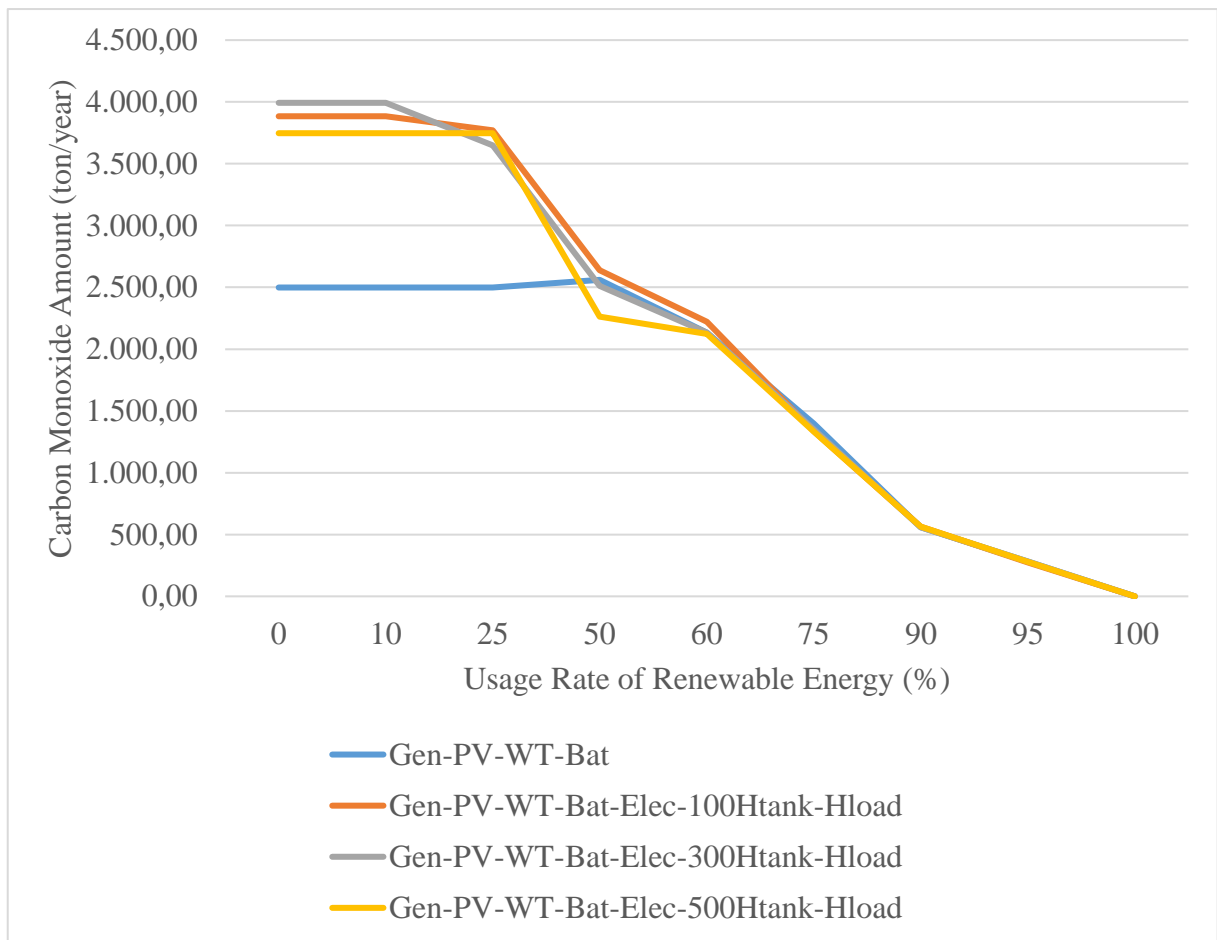


Figure 12. Carbon monoxide emissions of hybrid systems by renewable energy ratio (Yenilenebilir enerji oranına göre hibrit sistemlerin karbonmonoksit emisyonları)

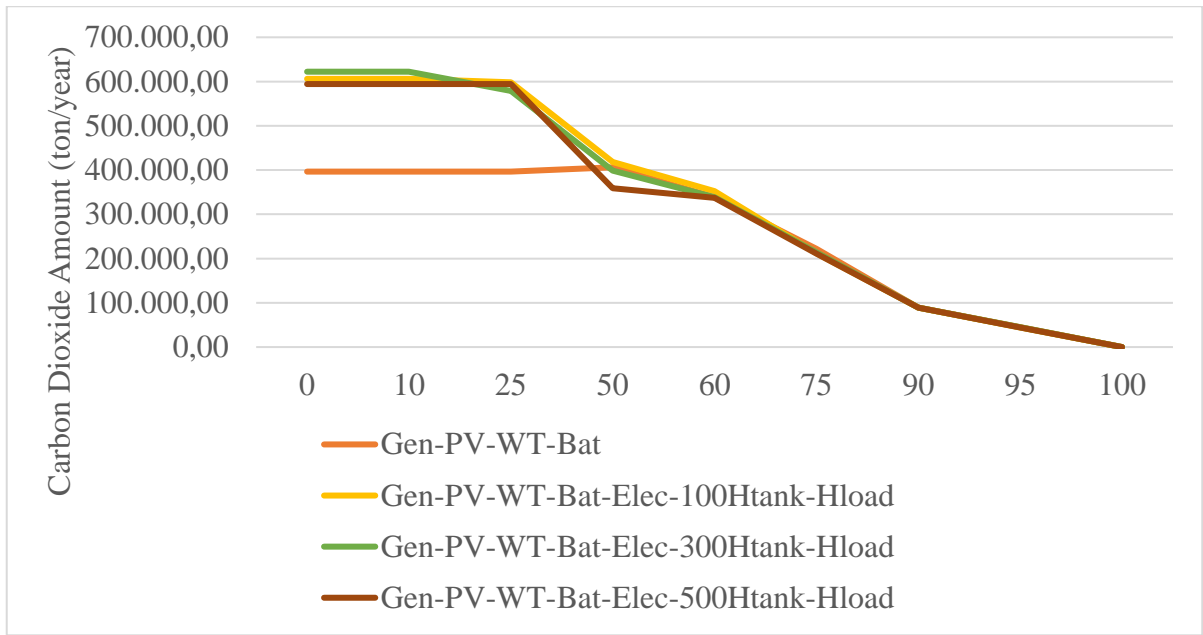


Figure 13. Carbon dioxide emissions of hybrid systems by renewable energy ratio (Yenilenebilir enerji oranına göre hibrit sistemlerin karbon dioksit emisyonları)

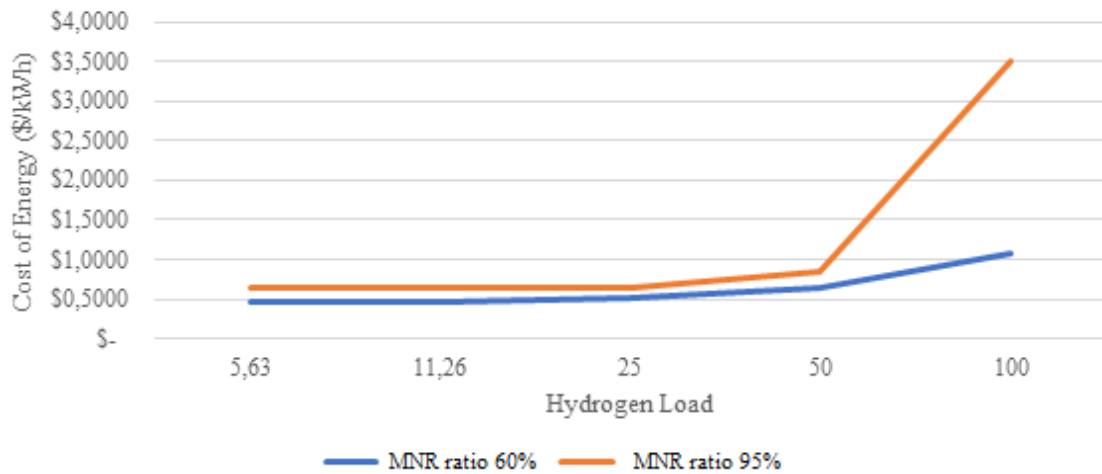


Figure 14. Electric load 3997104 kwh/day, variable hydrogen load system design cost variation by MNR ratio (Elektrik yükü 3997104 kwh/gün, değişken hidrojen yüklü sistem tasarım maliyetinin MNR oranına göre değişimi)

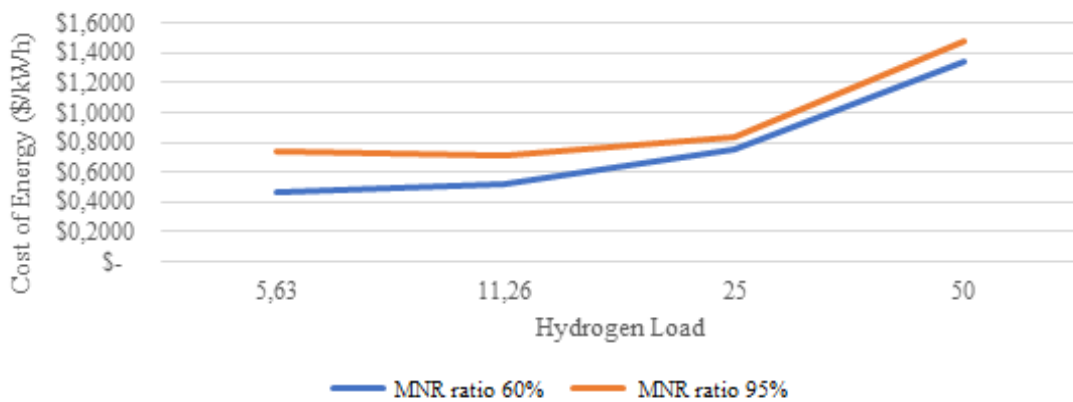


Figure 15. Cost variation of electric load 1000 kwh/day, variable hydrogen load system design according to MNR ratio (Elektrik yükünün maliyet değişimi 1000 kwh/gün, MNR oranına göre değişken hidrojen yüklü sistem tasarımı)

Table 1. system specifications with 500 kg hydrogen tank capacity for Yenice district (Yenice ilçesi 500 kg hidrojen tankı kapasiteli sistem özellikleri)

System Component	Name	Size	Unit
Generator	Autosize Genset	700,000	kW
Solar Panel	Generic Flat Plate PV	836,266	kW
Storage System	Generic 1 kWh Li -On	6,561,842	strings
Wind Turbine	Generic 3 kW	905.895	ea.
Converter	System Converter	912.915	kW
Electrolyzer	Generic Electrolyzer	100	kW
Hydrogen Tank	Hydrogen Tank	500	kg

The system specifications with the 100% renewable energy rate used for the design of the Gen-PV-WT-Elec-Bat-500Htank-H loaded system of Yenice district were shown in Table 1. The system consisted of 700,000 kW diesel generators, 836,266 kW solar panels, 6,561,842 kWh Li-On batteries of 1kWh, 905,895 wind turbines of 3 kW each, 912,915 kW converters, 100 kW electrolyzer, 500 kg hydrogen storage. In case of that the system cannot meet the demand, it was met by using hydrogen energy to meet the energy demand. Although the cost of using hydrogen energy was higher at the moment, this situation would change with the damage to the environment and the developing technology. With this change, energy production costs would decrease and hydrogen usage capacity would increase or decrease with the reduce in energy production unit costs and the reduce in the use of fossil fuels. When it came to the cost of the renewable energy system, the capital cost, operating cost, replacement cost, recovery cost, and resource cost were given in Figure 16. When the costs were examined, the highest capital cost consisted of wind turbines and batteries.

Among the designed systems, the PV power output with a 500 kg hydrogen tank was seen in Figure 15 and the WT power outputs were shown in Figure 16. While the PV system was operated for 4375 hours in a year and provided an average hourly energy production of 235,988 kW, it operated with a capacity factor of 14.7% and contributed to the total production of 2,067,250,845 kWh/year. While the WT system operated for 6673 hours in a year and provided an average hourly energy production of 46.313 kW, it worked with a capacity factor of 13.3% and contributed to the total production of 405.706.044 kWh/year.

The hourly occupancy rate of the hydrogen tank in the system, which had a 500 kg hydrogen tank, was shown in Figure 17. The hydrogen tank storage capacity was 500 kg, while the capacity at the beginning of the year was 250 kg, it was filled with

a capacity of 202 kg at the end of the year. In addition to these features, the hydrogen storage capacity was 16,667 kWh, while the hydrogen tank capacity appeared to be at full capacity with 500 kg in August, September, and October.

Li-On batteries with 2,982,871 kWh were used in the hybrid system. The graph showing the hourly charge capacity of these batteries in a year was depicted in Figure 18. The average energy production of the batteries was 542,221,781 kWh/year. When the graph was examined, it was seen that their capacity was usually full annually between 12:00 and 18:00. It was determined that it consumed energy between 18:00 and 11:00.

The graph that deals with the energy output of the renewable energy production of the whole system was shown in Figure 19. 81.6 % of the total energy production was obtained from solar panels with a production of 2.067.250.845 kWh/year, 16% from wind turbines with 405.706.044 kWh/year, 2.43% from 61,718.347 kWh/year. Production was made from the generator with annual production. The ratio of the renewable energy capacity used to the total capacity was 97.6% as instant renewable energy output. The monthly average representation of electricity production was given in Figure 20. While solar panels had the highest share in electricity production, it was followed by wind turbines. It turned out that the generator had the lowest share in electricity production.

It was observed that the filling capacity of the hydrogen tank increased when the MNR Ratio was changed. When the MNR ratio was 60%, the occupancy rate decreased. In this context, the occupancy rate according to the variable hydrogen load with the 300 kg hydrogen tank and the MNR rate of the fixed electrically loaded system was shown in Figure 23.

In this study, the occupancy rate according to the variable hydrogen load of the 300 kg hydrogen tank and the MNR rate of the fixed electrically loaded

system is shown in Figure 24. When the electric load is 1000 kWh/day and the hydrogen load is 5.63-11.26-25-50, 8 cases are examined as MNR Ratio 60-95. As a result of this modelling, the filling capacity of the hydrogen tank was examined. When the occupancy rate of the hydrogen tank capacity is controlled, it has been observed that when the

hydrogen load is low, the occupancy rate is high, and when the hydrogen load is high, there are fluctuations in the occupancy rate. The investigations have shown that the filling capacity of the hydrogen tank increases when the MNR Ratio is changed. When the MNR ratio is 60, the occupancy rate decreases.

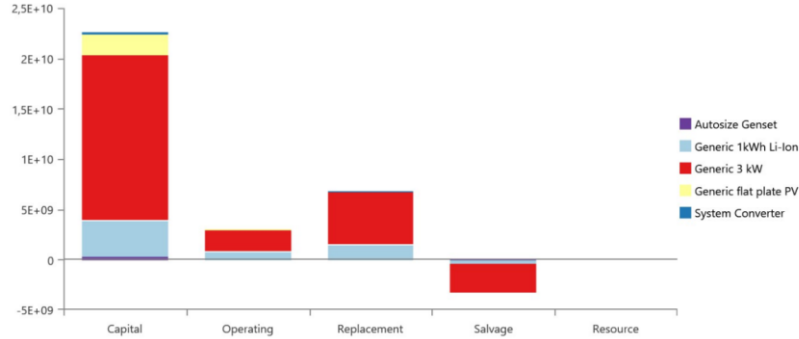


Figure 16. Cost summary of hybrid system for 100% renewable energy ratio (%100 yenilenebilir enerji oranı için hibrit sistemin maliyet özeti)

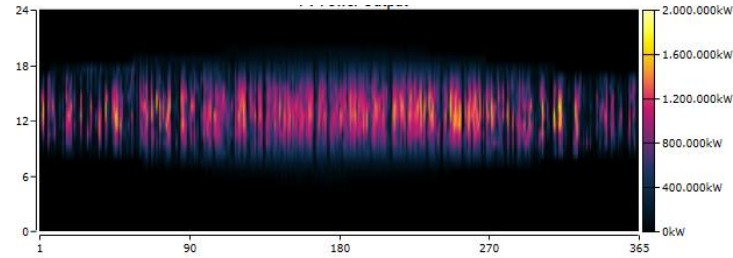


Figure 17. PV energy output of the hybrid system (kW) (Hibrit sistemin PV enerji çıkışı)

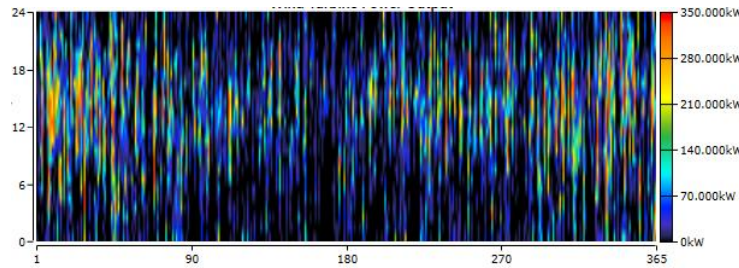


Figure 18. WT energy output of the hybrid system (kW) (hibrit sistemin WT enerji çıkışı)

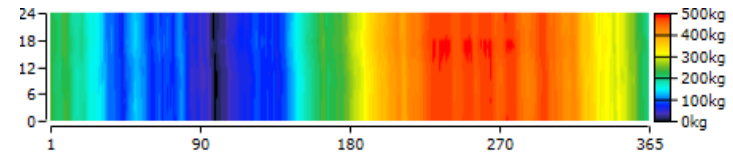


Figure 19. Hydrogen tank capacity of the hybrid system (hibrit sistemin hidrojen tankı kapasitesi)

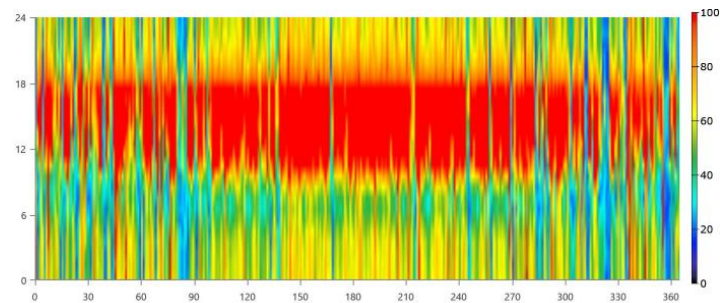


Figure 20. 1 kWh li-ion battery charge status used in system design (Sistem tasarımında kullanılan 1 kwh li-ion akü şarj durumu)

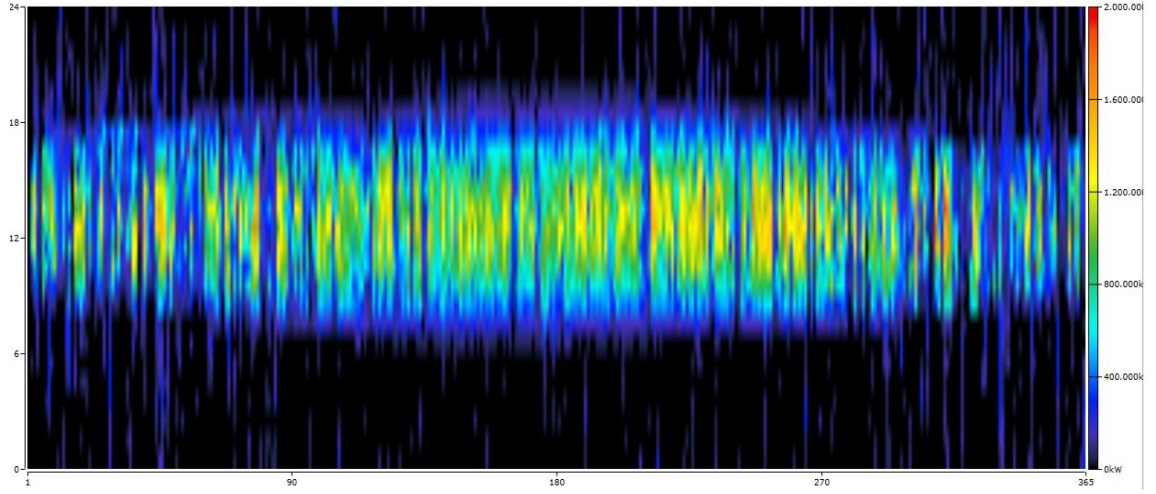


Figure 21. Renewable energy output of total hybrid system (Toplam hibrit sistemin yenilenebilir enerji çıkışı)

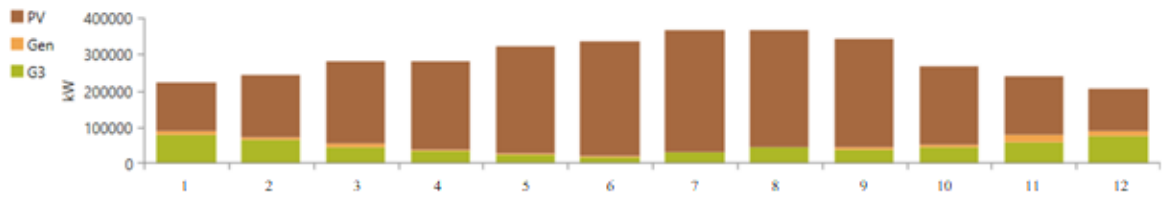


Figure 22. Monthly average electricity production (Aylık ortalama elektrik üretimi)

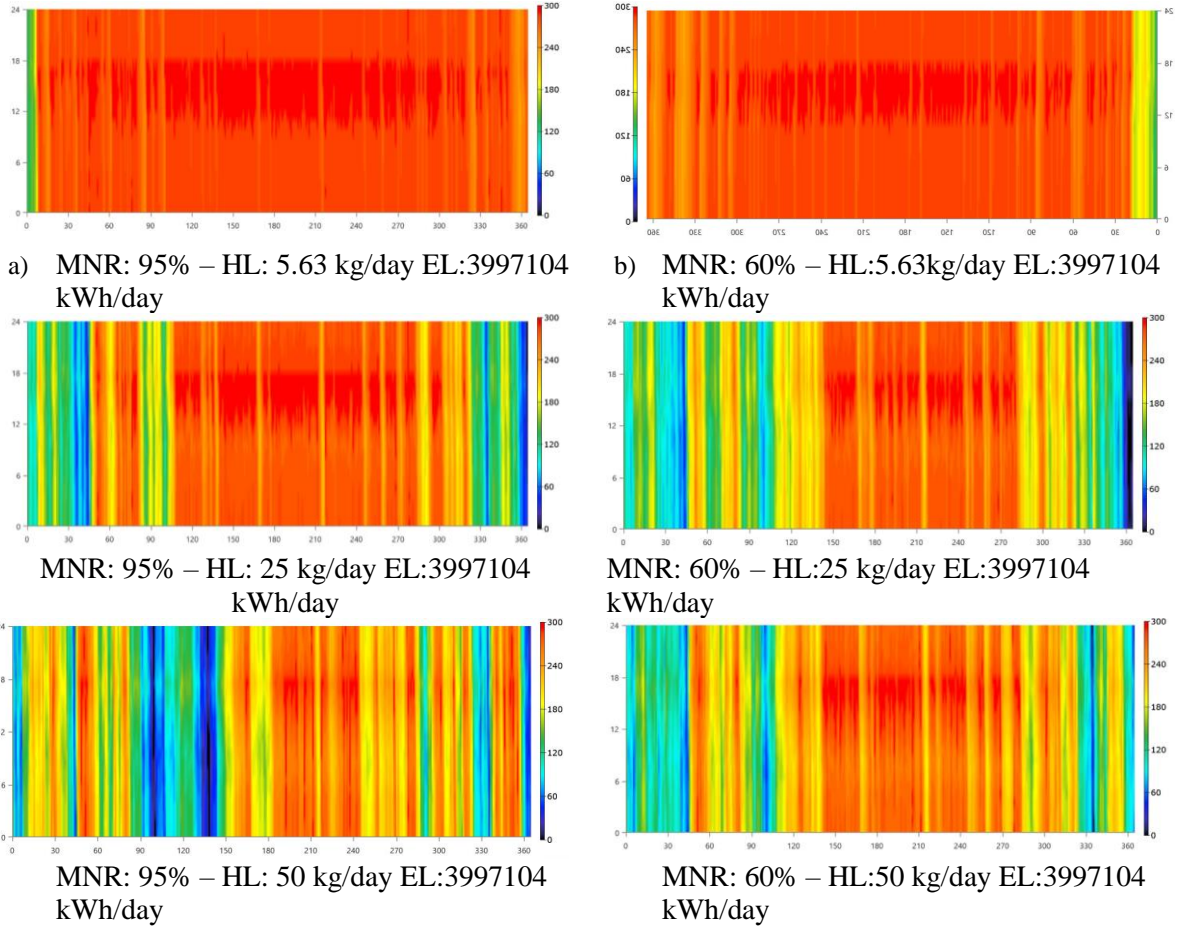


Figure 23. Display of hydrogen tank level at variable MNR rate with electric load 3.997.104 kwh/day and different hydrogen load (3.997.104 kWh/gün elektrik yükü ve farklı hidrojen yükü ile değişken MNR oranında hidrojen tankı seviyesinin gösterimi)

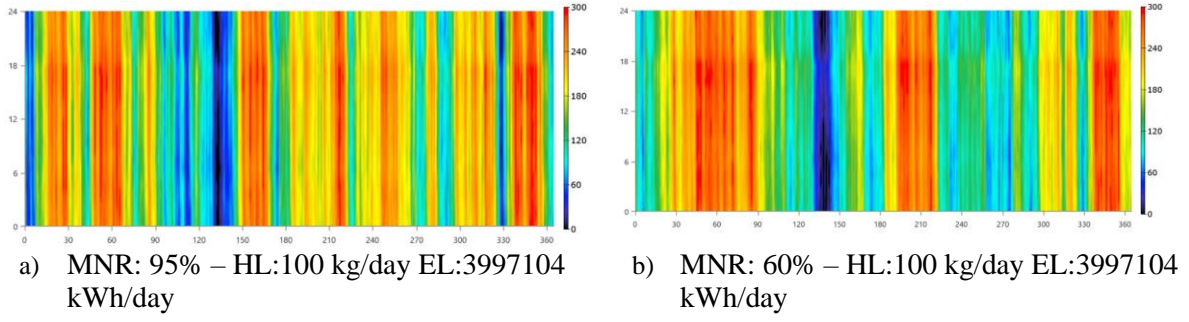


Figure 23. Continued (Devamı)

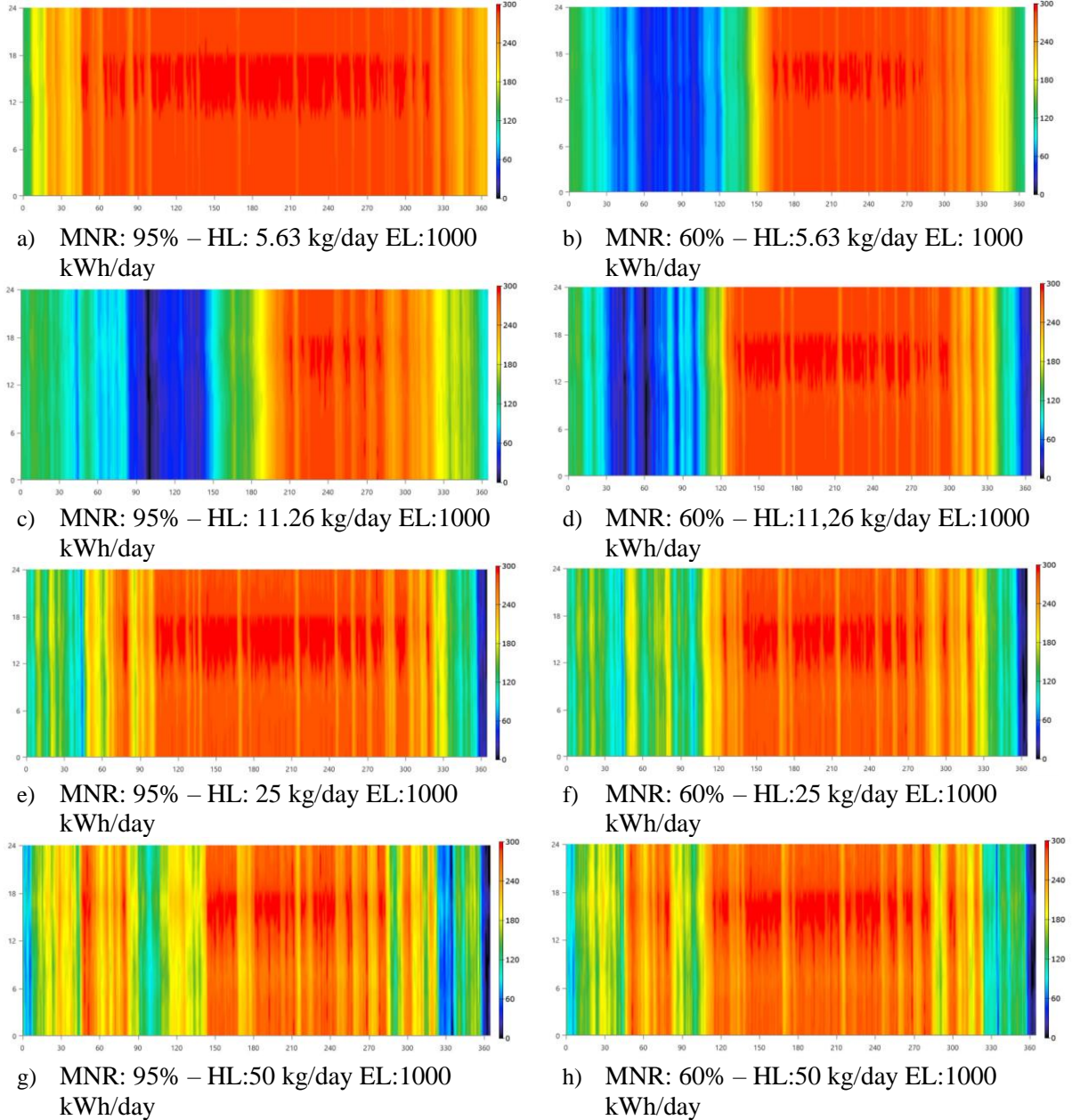


Figure 24. Hydrogen tank level display at variable MNR rate with electric load 1000 kwh/day and different hydrogen load (1000 kWh/gün elektrik yükü ve farklı hidrojen yükü ile değişken mnr oranında hidrojen tankı seviye gösterimi)

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, an optimum hybrid system research was carried out to meet the energy demand of the Yenice district of Karabük province with a capacity of 3.997.104 kWh/day. In the hybrid system design, in addition to the hydrogen tank with different capacities, a system design was made from a generator, a solar panel, a wind turbine, and batteries. Energy costs and environmental damages were evaluated according to the percentage of using renewable energy. The most cost-effective system was the Gen-PV-WT-Bat system with \$7,069,438, ignoring the damage to the environment where there was no renewable energy usage. The unit energy cost of this system was \$ 0.4410, while the damage be caused to the environment emitted 396,209.06 tons/year of carbon dioxide gas and 2,497.48 tons/year of carbon monoxide gas. When the renewable energy rate of the same system was 100%, the damage to the environment could not be found, while the unit energy cost was \$1.82. According to the evaluation of the simulation results, Gen-PV-WT-Bat-Elec-300Htank-H was the most cost-effective system despite having the highest fuel consumption. While the unit energy cost of this system was \$0,6322.

When the electric load was 3.3997.104 kWh/day and the hydrogen load was 5.63-25-50-100, 8 cases were examined as MNR Ratio with 60%-95%. As a result of this examination, the filling capacity of the hydrogen tank was considered. When the occupancy rate of the hydrogen tank capacity was controlled, it was observed that when the hydrogen load was low, the occupancy rate was high, and when the hydrogen load was high, there were fluctuations in the occupancy rate.

According to the results of all system simulations, although the use of renewable energy sources caused an increase in the unit energy cost and net present cost, when the effect of damage to the environment was deducted, hybrid systems using 95% renewable energy could be installed. In addition to all these, it was revealed that off-grid hybrid systems would not be suitable for having a single energy source because they were far from the grid, and systems that complement each other would be beneficial for uninterrupted energy production. Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) have proven to be a viable solution to meet local loads in off-grid, rural, or privately owned residential or agricultural use. According to the results of the study, it was found that it was suitable for use by making optimum sizing.

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)

Esra BAYIR: She performed the simulations in the research, analyzed the results and contributed to the writing of the article.

Araştırmadaki simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Halil Hakan AÇIKEL: He performed the simulations in the research, analyzed the results and contributed to the writing of the article.

Araştırmadaki simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına 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] Chauhan A, Saini R. P. Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system. *Energy*, 2017, 124: 59-73.
- [2] Sharma B, Dahiya R, Nakka J. Effective grid connected power injection scheme using multilevel inverter based hybrid wind solar energy conversion system. *Electric Power Systems Research*, 2019, 171: 1-14.
- [3] Sikder P S, Pal N. Modeling of an intelligent battery controller for standalone solar-wind hybrid distributed generation system. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2020, 32.6: 368-377.
- [4] Fesli U, Bayır R, Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system. In: 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009. IEEE, 2009. p. I-29-I-33.
- [5] Buonomano A, et al. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation

- and economic assessment. *Energy*, 2018, 155: 174-189.
- [6] Fathabadi H. Novel standalone hybrid solar/wind/fuel cell power generation system for remote areas. *Solar Energy*, 2017, 146: 30-43.
- [7] Genç M S. Economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in central anatolian Turkey. *Clean energy systems and experiences*, 2010, 131-154.
- [8] Dursun B. Determination of the optimum hybrid renewable power generating systems for Kavakli campus of Kırklareli University, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16.8: 6183-6190.
- [9] NREL, National Renewable Energy Laboratory, Alliance for Sustainable Energy LLC. [Online] Available: <https://www.nrel.gov>.
- [10] Homer Software. [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com/index.html>.
- [11] Altun A F, Kilic, M. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. *Renewable Energy*, 2020, 157: 424-443.
- [12] Bakić V V, Pezo M L, Stojković S M. Technical and economic analysis of grid-connected PV/Wind energy stations in the Republic of Serbia under varying climatic conditions. *FME Transactions*, 2016, 44.1: 71-82.
- [13] Khare V, Nema S, Baredar P. Solar-wind hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 23-33.
- [14] Akarsu B, Genç M S. Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems. *Fuel*, 2022, 324: 124465.
- [15] Toklu E. Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy*, 2013, 50: 456-463.
- [16] Erdil A, Erbiyik H. Renewable energy sources of Turkey and assessment of sustainability. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, 207: 669-679.
- [17] Genç M S, Gökçek, M. Evaluation of wind characteristics and energy potential in Kayseri, Turkey. *Journal of Energy Engineering*, 2009, 135.2: 33-43.
- [18] Sharma R, Kodamana H, Ramteke M. Multi-objective dynamic optimization of hybrid renewable energy systems. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 170: 108663.
- [19] Rullo P, et al. Integration of sizing and energy management based on economic predictive control for standalone hybrid renewable energy systems. *Renewable energy*, 2019, 140: 436-451.
- [20] Chennaif M, et al. Tri-objective techno-economic sizing optimization of Off-grid and On-grid renewable energy systems using Electric system Cascade Extended analysis and system Advisor Model. *Applied Energy*, 2022, 305: 117844.
- [21] Ashtiani M N, et al. Techno-economic analysis of a grid-connected PV/battery system using the teaching-learning-based optimization algorithm. *Solar Energy*, 2020, 203: 69-82.
- [22] Al-Falahi M D, Jayasinghe S D G, Enshaei H J E C C. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy conversion and management*, 2017, 143: 252-274.
- [23] Genç M S. Economic viability of water pumping systems supplied by wind energy conversion and diesel generator systems in North Central Anatolia, Turkey. *Journal of Energy Engineering*, 2011, 137.1: 21-35.
- [24] Connolly D, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied energy*, 2010, 87.4: 1059-1082.
- [25] Sinha S, Chandel S S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 32: 192-205.
- [26] Bernal-Agustín, J L, Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2009, 13.8: 2111-2118.
- [27] Khan M J, Iqbal M T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renewable energy*, 2005, 30.6: 835-854.
- [28] Younas M, et al. An overview of hydrogen production: current status, potential, and challenges. *Fuel*, 2022, 316: 123317.
- [29] Munuswamy S, Nakamura K, Katta A. Comparing the cost of electricity sourced from a fuel cell-based renewable energy system and the national grid to electrify a rural health centre in India: A case study. *Renewable Energy*, 2011, 36.11: 2978-2983.
- [30] Zhang L, et al. A two-stage benefit optimization and multi-participant benefit-sharing strategy for hybrid renewable energy systems in rural areas under carbon trading. *Renewable Energy*, 2022, 189: 744-761.

- [31] Mousavi S A, et al. A new decision-making process by integration of exergy analysis and techno-economic optimization tool for the evaluation of hybrid renewable systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101196.
- [32] Johannsen R M, Østergaard P A, Hanlin R. Hybrid photovoltaic and wind mini-grids in Kenya: Techno-economic assessment and barriers to diffusion. *Energy for Sustainable Development*, 2020, 54: 111-126.
- [33] Mousavi S A, et al. Decision-making between renewable energy configurations and grid extension to simultaneously supply electrical power and fresh water in remote villages for five different climate zones. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123617.
- [34] Islam, M S, Akhter R, Rahman M A. A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?. *Energy*, 2018, 145: 338-355.
- [35] Mandal S, Das B K, Hoque N. Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 12-27.
- [36] Saha P, et al. Performance optimization of hybrid renewable energy system for small scale micro-grid. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 63: 527-534.
- [37] Kumar R, Channi H K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 349: 131347.
- [38] Shiroudi A, et al. Case study: Simulation and optimization of photovoltaic-wind-battery hybrid energy system in Taleghan-Iran using homer software. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012, 4.5.
- [39] Amutha W M, Rajini V. Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 236-246.
- [40] Genç G, Çelik M, Genç, M S. Cost analysis of wind-electrolyzer-fuel cell system for energy demand in Pınarbaşı-Kayseri. *International journal of hydrogen energy*, 2012, 37.17: 12158-12166.
- [41] Genç, M S, Çelik M, Karasu İ. A review on wind energy and wind-hydrogen production in Turkey: A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion system in Central Anatolian Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16.9: 6631-6646.
- [42] Genç, M S, et al. Suitable site selection for offshore wind farms in Turkey's seas: GIS-MCDM based approach. *Earth Science Informatics*, 2021, 14.3: 1213-1225.
- [43] Karipoğlu F, Genç M S, Koca K. Determination of the most appropriate site selection of wind power plants based Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making approach in Develi, Turkey. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 2021.
- [44] Açikel H H, Bayır E. Evaluation of capacity of hybrid energy systems to decrease the environmental pollution. *Fuel*, 2022, 328: 125356.
- [45] Arslan O, Acikkalp Emin, Genc G. A multi-generation system for hydrogen production through the high-temperature solid oxide electrolyzer integrated to 150 MW coal-fired steam boiler. *Fuel*, 2022, 315: 123201.
- [46] Türkiye İstatistik Kurumu,[Online]. Available: <https://www.tuik.gov.tr>.
- [47] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, [Online]. Available: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>.
- [48] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, [Online]. Available: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/KARABU> K-REPA.

Akü Bileşenlerinin Akü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

İbrahim ÜLKE¹, Muhammed Ferhat ÖZTÜRK¹, Mustafa YURDAKUL¹, Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹ Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

² Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/09/2023
Düzeltilme: 15/11/2023
Kabul: 27/11/2023

Anahtar Kelimeler

Deney Tasarımı
Enerji
Üretim Teknolojileri
MOORA

Article Info

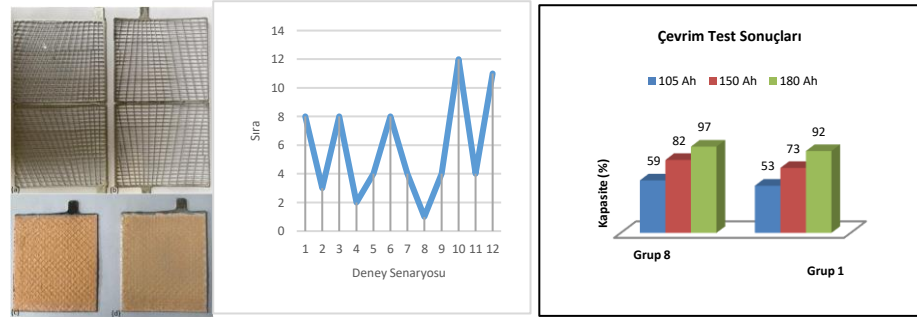
Research article
Received: 18/09/2023
Revision: 15/11/2023
Accepted: 27/11/2023

Keywords

Design of Experiment
Energy
Production Technologies
MOORA

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu makalede çok ölçütlü karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak kurşun asit akü bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle akü performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte süylenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.



Şekil A: Ana yapı, sıralama ve performans testi sonuçları /Figure A: Main frame, ranking and performance test results

Önemli noktalar (Highlights)

- MOORA yöntemi ile akü tasarımı iyileştirilmiştir/ Battery design has been improved with the MOORA method.
- Arzu edilen performansı sağlayan parametre seti belirlenmiştir/ The parameter set that provides the desired performance has been determined.
- Çevrim testlerinde %5,4 ila %12,3 oranlarında iyileşme elde edilebilmiştir/ In cycle tests, an improvement of 5.4% to 12.3% could be achieved.

Amaç (Aim): Bu çalışmada MOORA (multi-objective optimisation on the basis of ratio analysis) yöntemi kullanılarak birden fazla akü bileşeni aynı anda incelenip en iyi akü tasarımı seçenekler arasında belirleyebilecek bir model önerilmiştir.

Originality (Özgünlük): 12 ay sonunda iç direnç ve voltaj ölçümleri yapıldıktan sonra en iyi sonucu veren parametre seti ilk uygulama olarak MOORA yöntemiyle belirlenmiş, seçilen set için XRD analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri yorumlanmıştır. Bu sayede bütünlük bir en iyileme yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bulgular (Results): MOORA yöntemi ile tespit edile en iyi sete ait SEM analizlerinde 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu ve bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışmada akü bileşenlerindeki değişikliklerin performansa etkilerinin incelenmesi hedeflenmiş olup, tribazik kurşun sülfatın, 1-4 mm uzunluğunda ve 0,2-0,8 mm çapında prizmatik kristaller oluşturduğu yapılan deney sonuçlarından görülmüştür. Tetrabazik kurşun sülfat ise 10-100 mm uzunluğunda ve 3-15 mm çapında prizmatik kristaller içermektedir. Çalışma sonucunda, kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte süylenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.



Akü Bileşenlerinin Akü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

İbrahim ÜLKE¹, Muhammed Ferhat ÖZTÜRK¹, Mustafa YURDAKUL¹, Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹ Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

² Baskent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/09/2023
Düzeltilme: 15/11/2023
Kabul: 27/11/2023

Anahtar Kelimeler

Deney Tasarımı
Enerji
Üretim Teknolojileri
MOORA

Öz

Kurşun asit akülerde çevrim ömrü ızgara kalınlığı, ızgara malzemesi, plaka hamur kimyasalı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörlerin akü performansına olan etkileri önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada plaka yapısında sülyen ve/veya kostikli asit kullanımının, tanecik yapısının, plaka kalınlığının, ızgara yapısında kullanılan antimuanın ve kalsiyumun etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Birçok değişkenin etkisinin incelendiği bu makalede çok ölçütlü karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak kurşun asit akü bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle akü performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonuçları daha yüksek oranlı 4BS tanecikli iç yapıya sahip plakaların 3BS tanecik yoğunluklu iç yapıya sahip plakalara kıyasla akü performansında artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca ızgara yapısında katkı maddesi olarak Kalsiyum (Ca) yerine Antimuan (Sb) kullanımının kurşun asit akülerin iç direncinde düşüşe sebep olduğu ve bu sayede çevrim ömrünün artmasını sağladığı belirlenmiştir. Çalışma sonunda en iyi performans değerlerini veren kombinasyonun iç yapı analizleri yapılmış ve geleneksel kurşun asit akülerle kıyaslanmış, iç yapıda yapılacak değişiklikler ile akü iç direncinin azaltılabileceği ortaya konulmuştur. En iyilenen gruba ait SEM analizlerinde 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu ve bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir.

Investigation of the Effects of Battery Components on Battery Performance

Article Info

Research article
Received: 18/09/2023
Revision: 15/11/2023
Accepted: 27/11/2023

Keywords

Design of Experiment
Energy
Production Technologies
MOORA

Abstract

The cycle life of lead-acid batteries varies depending on various factors such as grid thickness, grid material, and plate paste chemicals. The effects of these factors on battery performance is an important research subject. In this study, the effects of the use of lead and/or caustic acid in the plate structure, grain structure, plate thickness, antimony, and calcium used in the grid structure were to be explained. This research article, where the effects of many variables are examined, aims to improve battery performance by making changes to lead acid battery components using the MOORA, a multi-criteria decision-making method. The study results showed that plates with an internal structure with a higher ratio of 4BS grains increase battery performance compared to plates with an internal structure with 3BS grain density. In addition, it has been determined that the use of Antimony (Sb) instead of Calcium (Ca) as an additive in the grid structure causes a decrease in the internal resistance of lead acid batteries and thus increases the cycle life. At the end of the study, internal structure analyses of the combination that gave the best performance values were made and compared with traditional lead acid batteries, and it was revealed that the internal resistance of the battery could be reduced with changes to the internal structure. The SEM analysis of the most improved group determined that the 3BS phase content was 53% by weight, and the size distribution of basic sulfate particles was between 0.6 µm and 2.27 µm. According to the cycle test results of the initial group and the group with the best results, an improvement of 11.3% at 105 Ah, 12.3% at 150 Ah, and 5.4% at 180 Ah was achieved.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aküler kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisini kimyasal enerjiye birçok sefer dönüştürebilen cihazlar olarak tanımlanır [1]. Akü özellikle otomobillerde temelde ateşleme, yetersiz

durumda alternatörün elektrik gereksinimini karşılama ve dalgalanmalara karşı elektrik donanımının korunması gibi hayati işlemleri gerçekleştiren cihazdır. Elektrolit tiplerine göre aküler; kuru ve sulu olarak sınıflandırılır. Elektrolit

bir pasta haline getirilerek sabitlenmiş ise akü kuru akü, sıvı halde bulunuyorsa sulu akü adını alır. Şarj olmuş bir aküde (+) artı plakada kurşun dioksit (PbO_2), (-) eksi plakada ise süngerimsi gözenekli yapıya sahip kurşun (Pb) bulunur [2]. Deşarj işlemi sırasında kurşun dioksit ve kurşun, kurşun sülfata dönüşür. Geleneksel bir akümülatörün parçaları ve kritik bileşenleri plakalar, ayıraç, kutu ve kapak, kutup başları, gaz kapakları (buşonlar) ve elektrolittir [3, 4].

Kurşun asit aküler en eski akü çeşitlerinden biridir. Güvenilirlik, düşük maliyet gibi nedenlerden dolayı günümüzde hala en yaygın olarak kullanılan akü tipi olmasına rağmen lityum-iyon aküler gibi yeni nesil akülerle kıyaslandıkları zaman çeşitli eksikliklere sahiptirler. Bu eksikliklerin en önemlilerinden biri pratik enerji yoğunluklarının (123 Wh/kg) teorik enerji yoğunluklarına ($30-40 \text{ Wh/kg}$) kıyasla çok düşük olmasıdır [5]. Son yıllarda kurşun-asit akülerin enerji yoğunluğunu artırma üzerine yapılan çalışmalarda en sık tercih edilen yöntemlerden biri kurşun plakaları daha hafif malzemelerden imal edilmiş plakalarla değiştirmektir. Liu vd. [5] bu amaçla yüksek korozyon dayanımını da dikkate alarak titanyum alaşımlarını kullanırken Yang vd. [6] kalay-bronz alaşımını tercih ederek 7 Wh/kg 'lık bir artış elde etmişlerdir. Ancak, karşı plakada daha hızlı aşınma ve akü ömründe azalma gibi çeşitli olumsuzluklarla karşılaşmışlardır. Bunların yanında kurşun asit akülere korozyon direnci kazandırmak, aşınma dayanımı sağlamak veya hafifletmek amacıyla grafit oksit [7], monosodyum glutamat [8], borik asit [9], karbon [10] veya alüminyum sülfat [11] gibi çeşitli takviye malzemelerinin kullanılarak etkilerinin incelendiği çalışmalarda literatürde mevcuttur. Özellikle grafit oksit katkısı sayesinde pek çok iyileştirmeler yapılmış olsa da bu iyileştirmeler pozitif elektrotta aşırı aşınma gibi olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Literatür incelendiğinde kurşun asit akü bileşenlerinin bazılarında katkı maddeleri kullanarak çeşitli iyileştirmeler yapmaya yönelik pek çok çalışma mevcut olmasına rağmen birden fazla akü bileşenini dikkate alarak eniyilemeyi hedefleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin bu çalışmalardan birinde Göçmen [12] pil paketinde dağıtıcı kanalın şeklinin akış homojenliğini nasıl etkilediği araştırmıştır. Çalışmada önerilen tasarım, kanallarda en fazla %0,81 hava debi sapması sağlayarak, homojen bir hava dağılımı sunabilmiştir. Celen ve Kaba [13] ise, hava akış yönlendirici kanatların kullanımının prizmatik lityum-iyon batarya sıcaklığı üzerine etkisinin farklı çalışma şartlarında deneysel ve sayısal olarak

incelemişlerdir. Çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 20 Ah kapasiteye sahip torba tipi bir prizmatik lityum-iyon bataryanın termal yönetimi için akışkan olarak havanın kullanılması durumunda; akışkan giriş hızının ($0,5 \text{ m/s}$, 1 m/s , $1,5 \text{ m/s}$), deşarj hızının (2C, 3C, 4C) ve giriş sıcaklığının (15°C , 25°C , 35°C) batarya yüzey sıcaklığı ve farkına, ısı transfer hızına etkisi araştırılmıştır. Çetin vd. [14] ise 18 adet silindirik lityum iyon pilin oluşturduğu bir batarya donanımını, 1,5 mm cidar kalınlığındaki bakır plakalardan üretilmiş olan S tipi bir sıvı soğutma kanalı içerisine yerleştirerek sıvı soğutmalı sistemin soğutma performansını analiz etmiştir. Wu vd. [15] PV akü sistemlerinde yaşam döngüsü maliyetini en aza indirmek için bir optimizasyon modeli geliştirerek en iyi batarya kapasitesini tespit etmeye çalışmıştır. Chen vd. [16] akış düzeninin yeniden tasarlayarak hava soğutmalı sistemin soğutma verimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sezici vd [17] Chen vd [16] çalışmasından farklı olarak silindirik yapıdaki 18 adet lityum iyon pil hücrelerinden oluşan pil takımı için hava soğutmalı batarya kutusu tasarlayarak soğutma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ye vd. [18], iki soğutma plakası içeren bir lityum demir fosfat pil modülünün ana parametrelerini optimize etmek için ortogonal deneysel tasarım yöntemini uygulamışlardır. Dong vd. [19], ısı değişim kapasitesini korumak için doğal hava soğutmasını kullanan basit bir soğutma modunu kullanarak, metal levha güç akü kutusu yapısını daha hafif bir çerçeve yapısına optimize etmek için akü paketinin koruma seviyesini geliştiren bir çalışma sunmuşlardır. Akinlabi ve Solyalı [20], kapsamlı tarama makalelerinde çok az sayıda araştırmacının, pil tasarımı optimizasyonuna birden fazla işlevsel kısıtlama içeren çok amaçlı optimizasyon modellerini uyguladığını belirterek bu aradaki araştırma boşluğuna dikkat çekmişlerdir. Bunun yanında Tajik vd. [21] çalışmalarında çeşitli katot malzemeleri ekonomiklik, çevrecilik ve taktiksellik alt başlıklarında birden fazla (SAW-AHP, SAW-CILOS, SAW-AHP-CILOS, TOPSIS-AHP, TOPSIS-CILOS, TOPSIS-AHP-CILOS, CoCoSo-AHP, CoCoSo-CILOS, CoCoSo-AHPCILOS, MARCOS-AHP, MARCOS-CILOS ve MARCOS-AHP-CILOS) çok kriterli karar verme yöntemi ile incelenmiş ve yöntemler birbirleriyle karşılaştırılmış, akü bileşenleri için herhangi bir en iyileme çalışması yapılmamıştır.

Bu çalışmada MOORA (multi-objective optimisation on the basis of ratio analysis) yöntemi kullanılarak birden fazla akü bileşeni aynı anda incelenip en iyi akü tasarımını seçenekler arasından

belirleyebilecek bir model önerilmiştir. Bunun için öncelikle yaygın olarak kullanılmakta olan kurşun-asit akü bileşenleri belirli alternatifler (Tablo 1) dikkate alınarak tek tek karşılaştırılmış ve bu alternatifleri de içeren 12 farklı inceleme grubu oluşturulmuştur. Bu grupların 12 ay sonunda iç direnç ve voltaj ölçümleri yapıldıktan sonra en iyi sonucu veren grup belirlenmiş ve bu sonuç MOORA yönteminde elde edilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışma sonunda en iyi değerleri veren gruba ait XRD analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri yorumlanmıştır.

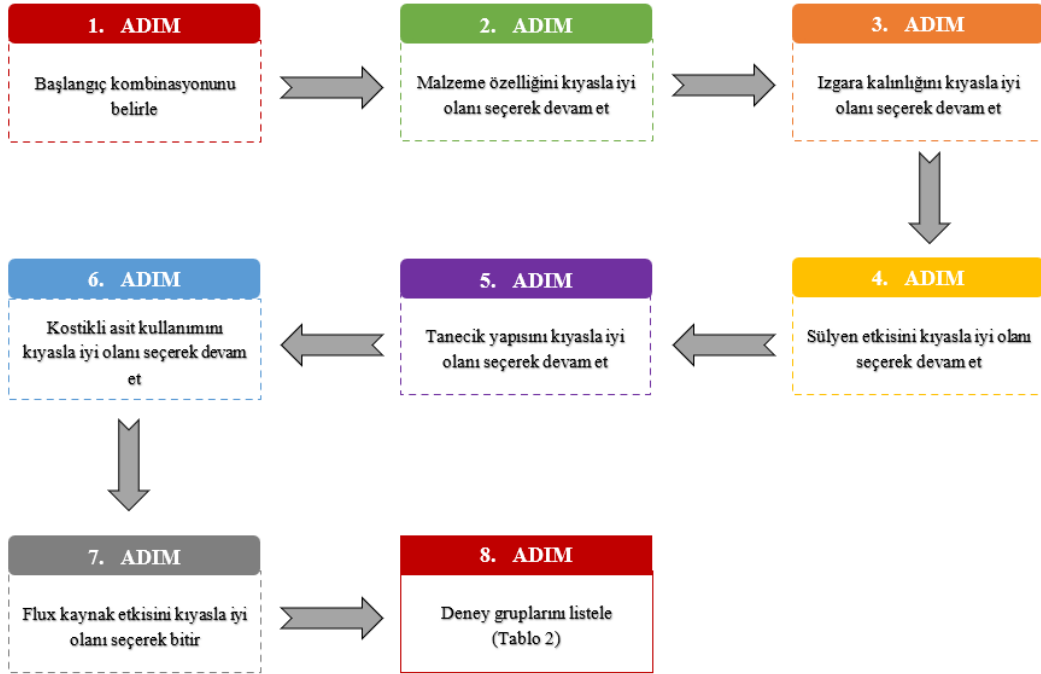
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERYAL VE METOD)

Kurşun-Kalsiyum alaşımlı akümülatörlerde oluşması beklenen korozyon pozitif ızgaralarda gelişir ve negatif ızgaralar korozyonun temel nedeni olmamaktadır. Korozyon direncinin artırılması için kalay, gümüş gibi elementler alaşıma eklenebilmektedir. Ancak bu durum negatif ızgara alaşım içeriklerinde Hidrojen oluşumuna neden olarak akümülatörde su kaybını artırmaktadır. Su kaybı yüksek olan ve korozyon direnci düşük olan akümülatörlerde çevrim ömürleri tamamlanamamaktadır.

Tablo 1. Bağımsız değişkenler (Independent variables)

Katkı Madde Özelliği	Malzemenin Özelliği	Izgara Kalınlığı
I.Sülyenli plaka	1.Kurşun-Antimuan alaşımlı ızgara	a)0,8 mm
II.Sülyensiz plaka	2.Kurşun-Kalsiyum alaşımlı ızgara	b)1,1 mm
III.3BS tanecik yapılı		
IV.4BS tanecik yapılı		
V.Kostikli asit kullanımı		
VI.Flux kaynak		

Bu nedenle tasarımı iyileştirilecek ızgaranın su kaybı düşük, direnci yüksek ve dolayısıyla akümülatör ömrü uzun olmalıdır. Bu çalışmada Tablo 1’de verilen bağımsız değişkenlerin akü performansına etkileri çok ölçütlü bir karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak incelenmektedir.



Şekil 1. Deney gruplarının oluşturulması süreci akış şeması (Flow chart of the process of creating experimental groups)

Tablo 2. Deney grupları (Experimental groups)

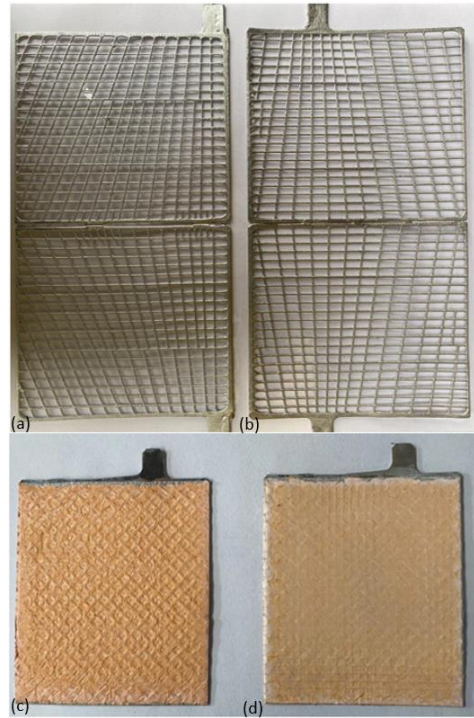
1. Karşılaştırma		2. Karşılaştırma		3. Karşılaştırma		4. Karşılaştırma		5. Karşılaştırma		6. Karşılaştırma	
Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Grup 5	Grup 6	Grup 7	Grup 8	Grup 9	Grup 10	Grup 11	Grup 12
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a
II	II	II	II	I	II	I	I	I	I	I	I
III	III	III	III	III	III	III	IV	III	III	III	III
V	V	V	V	V	V	V	V	V	-	V	V
VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	-

Çalışma kapsamında öncelikle birer aylık bekleme periyotlarında ikişerli kıyaslamalar yapılarak Tablo 1’de verilen her bir bağımsız değişken ayrı ayrı ele alınmış ve incelenen değişkenlerden hangisinin Kurşun-Asit aküler açısından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Çalışma başlangıcında Grup 1 olarak sıklıkla kullanılan Kurşun-Asit akülerdeki kombinasyon seçilmiştir. İlk karşılaştırmada değişken olarak malzeme özelliği ele alınmış ve Grup 1 ile Grup 2 kendi arasında kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonunda antimuanlı ızgaraya sahip olan Grup 1’den daha iyi sonuçlar elde edildiği için bir sonraki karşılaştırmalarda hep antimuanlı malzeme kullanılmıştır. Diğer karşılaştırmalarda da Şekil 1’de verilen işlem basamakları uygulanarak Tablo 2’de görülen 12 farklı deney grubu elde edilmiştir. Deney gruplarının elde edilmesinden sonra çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak en iyi deney grubu belirlenmiştir.

Tablo 2’de sunulan kombinasyonların kıyaslanmasında her kombinasyona ait akünün üçer adet üretimi yapıldıktan sonra aküler 12 ay boyunca herhangi bir şarj/deşarj işlemine tabi tutulmadan aynı ortamda bekletilmiş ve bu süre sonunda voltaj ve iç direnç değerlerinin ortalamaları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda en iyi değerleri veren grubun iç yapı özellikleri incelenmeye çalışılmış ve hangi deney grubunun iki farklı performans ölçütünde en iyi sonucu sunduğu MOORA yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney gruplarının oda sıcaklığında 12 aylık bekleme süresinden sonra test edilebilmesi için her gruba ait üretimler gerçekleştirilmiş, katkı maddesi ve alaşım elementine bağlı olarak çeşitli renk farklılıkları gözlemlenmiştir (Şekil 2). Kurşun-antimuan alaşımli ızgara üretimlerinde %1,8 oranında antimuan kullanılırken, kurşun-kalsiyum

alaşımli ızgaralarda kalsiyum oranı %0,09 olarak belirlenmiştir. Bütün ızgara dökümleri 470 °C’de yapılmış ve soğutma işlemleri 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Çekirdekleme katkısı ile (4BS) üretimi gerçekleştirilen pozitif plakalarda elde edilen morfolojinin kür prosesinde de oluşumunu sağlamak ve taneciklerin kontrolsüz büyümesini engellemek amacı ile düşük sıcaklıkta kürlenme (soft curing) işlemi gerçekleştirilmiştir. Çevrim testleri ise TS EN 50342-1 standardına uygun olarak 16 saat süreyle şarj edilmiş aküler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 5).



Şekil 2. (a) Kurşun-Antimuan alaşımli ızgara, (b) Kurşun-Kalsiyum alaşımli ızgara, (c) Sülyenli plaka, (d) Sülyensiz plaka (a)Lead-Antimony alloy grid, (b) Lead-Calcium alloy grid, (c) Plate with lead, (d) Plate without lead)

3. BULGULAR (RESULTS)

12 ay sonunda elde edilen voltaj ve iç direnç performans sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3 incelendiğinde en iyi sonucun 8. Deneyde elde edildiği görülebilmektedir.

Tablo 3. 12 ay sonunda voltaj ve iç direnç değerleri (Voltage and internal resistance values after 12 months)

DENEY GRUPLARI	VOLTAJ (V)	İÇ DİRENÇ (mohm)
1	12,345	3,48
2	12,501	3,46
3	12,345	3,48
4	12,516	3,42
5	12,357	3,47
6	12,345	3,48
7	12,357	3,47
8	12,601	3,39
9	12,357	3,47
10	12,21	3,54
11	12,357	3,47
12	12,301	3,49

Diğer taraftan Tablo 3'te verilen deney sonuçları için MOORA yöntemi uygulanarak hangi deneyde en iyi yanıtların alındığı analiz edilmiştir (Tablo 4). MOORA yönteminin uygulama adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.

Karar matrisinde satırlarda derecelendirilecek alternatifler ($i=1, \dots, m$, deneyler), sütunlarında ise değerlendirme kriteri ($j=1, \dots, n$) yer alır. Matriste, a_{ij} ise alternatifin ilgili ölçütteki değerini gösterir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Normalize karar matrisi oluşturulur.

Normalize matris, Eş. (2) ile oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2)$$

Ardından, R normalize karar matrisi elde edilir:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 3: Ölçütlerin ağırlıkları 1-10 ölçeği ile belirlenir. 1, en düşük, 10 ise en yüksek değeri gösterir.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 4. MOORA sıralama indeksi hesaplanır [22-23]:

$$Y_{ij}^* = \sum_{j=1}^t V_{ij} - \sum_{j=t+1}^n V_{ij} \quad (5)$$

Eşitlikte t, değerinin maksimum olması istenen kriter sayısıdır, (n-t) ise değerinin minimum olması istenen kriter sayısıdır, Y_{ij}^* ise deney senaryonun sıralama puanıdır.

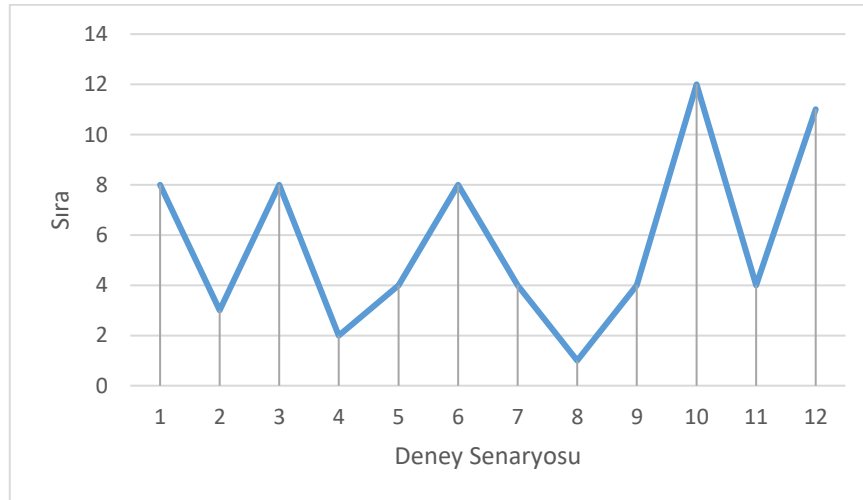
Tablo 4'te voltaj kriterinin ağırlığı 10, iç direnç kriterinin ağırlığı 1 olarak alınıp bir sıralama gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Sıralama sonuçlarında 8 numaralı deneyin ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Ağırlıklar voltaj kriterinin ağırlığı 1, iç direnç kriterinin ağırlığı 10 olarak ve her iki kriterin eşit ağırlıklı alındığı senaryolarla tekrar sıralandığında sıralama sonuçlarının değişmediği görülmektedir. Bu durum bize öncelikler değişse de yine 8. Deney grubun ilk sırada yer alabildiğini göstermektedir.

Tablo 4. MOORA uygulama Sonucu (Application result of the MOORA)

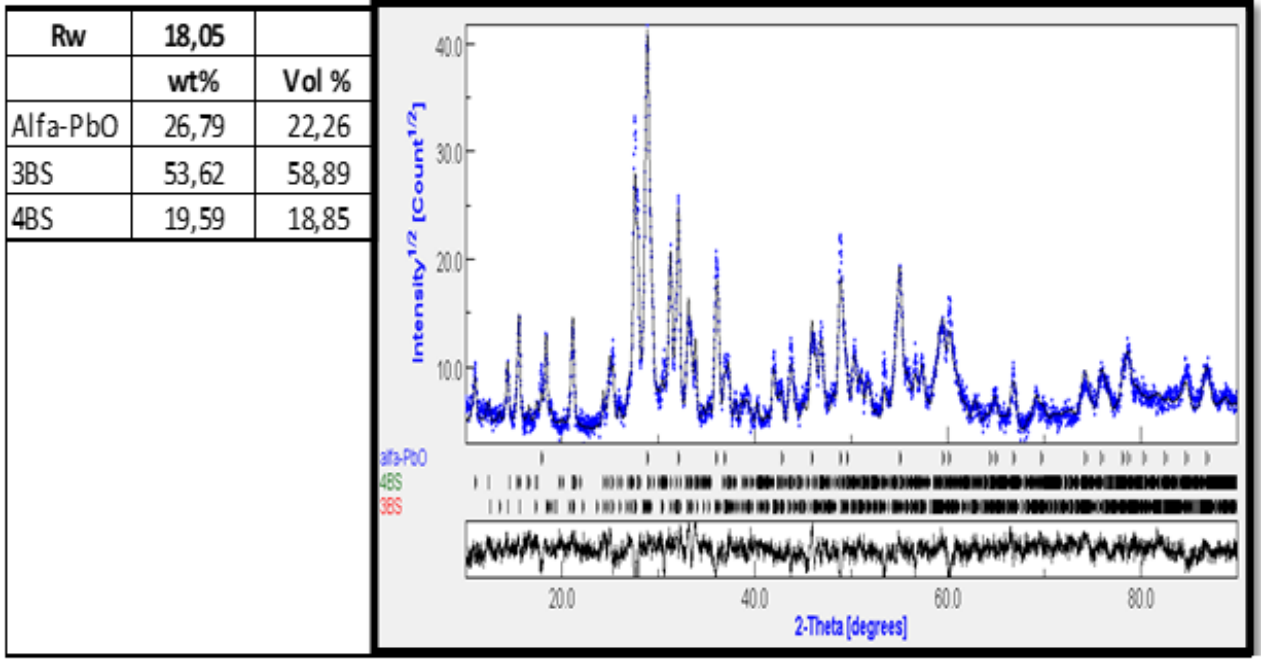
DENEY GRUPLARI	VOLTAJ (V)	İÇ DİRENÇ (mohm)	Normalize Matris		Ağırlıklı Normalize Matris		Y _{ij} *	Sıra
1	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
2	12,501	3,46	0,2914	0,2878	0,2649	0,0262	0,2388	3
3	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
4	12,516	3,42	0,2918	0,2845	0,2652	0,0259	0,2394	2
5	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
6	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
7	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
8	12,601	3,39	0,2938	0,2820	0,2671	0,0256	0,2414	1
9	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
10	12,21	3,54	0,2846	0,2945	0,2588	0,0268	0,2320	12
11	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
12	12,301	3,49	0,2868	0,2903	0,2607	0,0264	0,2343	11
		Ağırlık	10	1	11			
		Normalize Ağırlık	0,909091	0,090909				

Tablo 5. X grubu (3BS) ve Y grubu (4BS) akülere ait fonksiyonel test sonuçları (Functional test results of group X (3BS) and group Y (4BS) batteries)

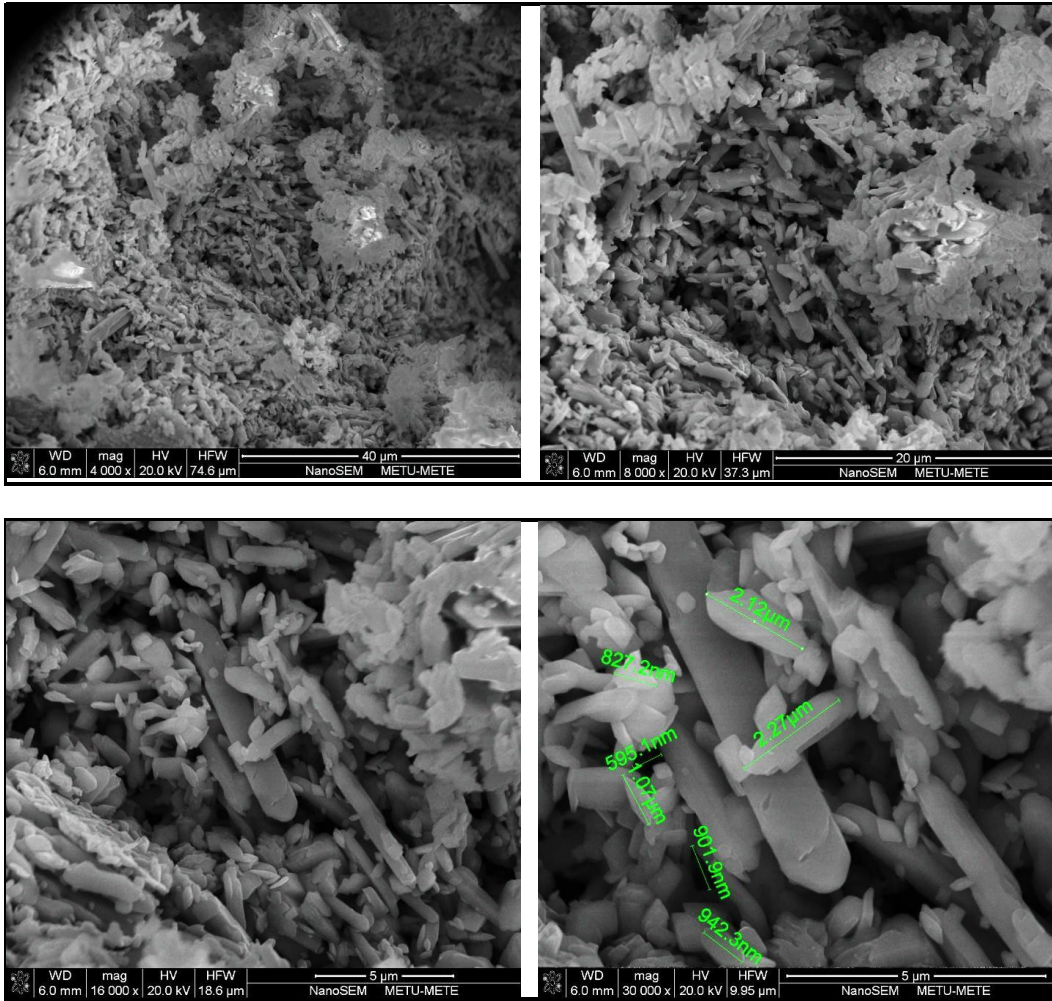
Plaka tipi	Katalog Kapasitesi (Ah/CCA)	Kod	Akü Grubu	Tasarım Ağırlığı	Ağırlık	1.C20 (Ah) Kapasite	CCA1		2.C20 (Ah) Kapasite	CCA2		3. C20 (Ah) Kapasite	CCA3	
							In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s		In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s		In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s
5x5/ 115	50/420	B	Y	12.4	13,184	52,57	8.33	198	49,87	8,43	185	48,22	7,84	126
		B	Y		13,184	55,968	8.08	171	52,217	8,41	178	51,887	Çevrim testi tamamlanmadı	
		A	X		13,184	54,59	7.92	218	56,75	7,77	183	52,49		8,14



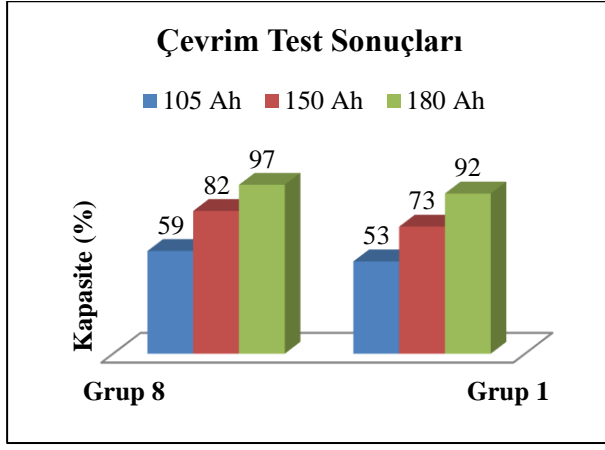
Şekil 3. Sıralama sonuçlarının grafik gösterimi (Graphical representation of ranking results)



Şekil 4. En yüksek verimi veren gruba ait XRD sonuçları (XRD results of the group with the highest efficiency)



Şekil 5. 8. Gruba ait SEM görüntüleri (SEM images of the group 8)



Şekil 6. Başlangıç grubu ve en iyilenen aküye ait çevrim test sonuçları (Cycle test results of the starting group and the optimized battery)

Düşük sıcaklıkta kürlenen ve çekirdekleştirme ajanı ile üretilen 4BS Plakaların kür programı etkisini incelemek için kürlenen 4BS Standart Plakalardan ve standart 3BS yapıları Plakalardan oluşan fazları tespit etmek için XRD (Şekil 4), mikro yapıyı incelemek için SEM (Şekil 5) ve gözeneklilik oranını incelemek için civalı porozimetre analizleri yapılmıştır.

Standart (3BS) kür programı ile kütleme sonucunda 4BS faz oranının %72 civarında olduğu gözlenmiştir. SEM analizi sonucunda bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 3,76 µm ile 8,65 µm aralığında olduğu görülmüştür. Tanecik boyutlarının B grubu Plakalara göre daha büyük olması, kür sıcaklığının tanecik büyümesi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Standart plakaların 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu (Şekil 4), hamur karma operasyonu esnasında gözlenebilecek bölgesel sıcaklık artışına dayalı olarak %19 oranında 4BS fazı içerdiği görülmüştür. SEM analizi incelendiğinde oluşan bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu ve bu durumun literatürde 1 ile 4 µm aralığında değişen boyutlara sahip 3BS morfolojisi özelliğine sahip üretimin gerçekleştirildiğini göstermektedir. Cıva porozimetresi ile analiz edilen parçacıklar arası gözeneklilik oranı ise küçük tanecik yapısına bağlı olarak %32,12 olarak gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Başlangıç grubu olan Grup 1 ve en iyi sonuçları veren Grup 8'e ait çevrim test sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde yaklaşık olarak %11,3 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde yaklaşık olarak %5,4'lük bir iyileştirme elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre üretilecek akülerde gözlenen çevrim test sonuçları

bazlı kapasite artışları akü ömrünün uzamasına bağlı olarak ömür bazlı maliyet kazançları elde edilmesine de aynı oranda katkı sağlayabilecektir. Burada ürün bazlı bir maliyet hesaplaması ticari ürün odaklı nedenlerle detaylı olarak gösterilememekle birlikte; elde edilen kapasite artışları baz alınarak birim fiyatlar bazında önemli bir iyileşmenin gerçekleştirilebildiği söylenebilir.

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada akü bileşenlerindeki değişikliklerin performansa etkilerinin incelenmesi hedeflenmiş olup, tribazik kurşun sülfatın, 1-4 mm uzunluğunda ve 0,2-0,8 mm çapında prizmatik kristaller oluşturduğu yapılan deney sonuçlarından görülmüştür. Tetrabazik kurşun sülfat ise 10-100 mm uzunluğunda ve 3-15 mm çapında prizmatik kristaller içermektedir. Çalışma sonucunda, kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte sülyenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.

Çalışmada oluşturulan 12 adet deney setinden elde edilen sonuçlar MOORA yöntemi ile değerlendirilmiş olup, 8 numaralı deney birinci sırada çıkmıştır. Bu sayede çok ölçütlü karar verme yöntemi ile elde edilen sonuç doğrulanarak, 8 numaralı deney grubunun seçenekler içerisinde en iyi sonucu veren grup olduğu görülmüştür.

Çalışmamızda yapılan testlerin maliyet durumu gözetilerek bir deney tasarımı metodolojisine dayalı analiz gerçekleştirilmemiştir. Deney gerçekleştirilebilme sayısı sınırlı bir sayıda olduğu için oldukça az deneyle bir en iyileme çalışması gerçekleştirme gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu nedenle deney sonuçları MOORA yöntemi ile analiz edilerek en iyi parametre değerleri bulunmaya çalışılmıştır. İleriki çalışmalarda deney tasarımı metodolojisi kullanılarak faktöriyel tasarım, yanıt yüzeyi metodu, Taguchi Yöntemleri gibi deney tasarım metodlarıyla çalışmalar yapılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

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)

İbrahim Ülke: Deney planı ile sonuçların analizi ve makalenin yazım işlemleri.

Experimental plan, analysis of the experimental results, and performing of the writing process.

Muhammed Ferhat Öztürk: Deneylerin yapılması, sonuçların analizi ve makalenin ilk halinin oluşturulması.

Conducting the experiments, analyzing the results, and performing the writing of the draft.

Mustafa Yurdakul: Sürecin yönetimi, konsept tasarımı, sonuçların analiz ve yorumlanması, yazım kontrolü.

Supervising the process, conceptual design, analysis and interpreting of the results, and editing.

Yusuf Tansel İç: Sürecin yönetimi, konsept tasarımı, sonuçların analiz ve yorumlanması, makalenin yazımı ve MOORA yönteminin uygulanması

Supervising the process, conceptual design, analysis, and interpretation of the results, performing the writing process, and the application of the MOORA method.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cho, J., Jeong, S., & Kim, Y. Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015; 48, 84-101.
- [2] Jafari, H., & Rahimpour, M. R. Pb acid batteries. *Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications*. 2020; 17-39.
- [3] Czerwiński, A., Wróbel, J., Lach, J., Wróbel, K., & Podsadni, P. The charging-discharging behavior of the lead-acid cell with electrodes based on carbon matrix. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018; 22: 2703-2714.
- [4] Akar, A. Oomobiller için yenilikçi bir akü koruma cihazı tasarımı, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2020.
- [5] Liu, D., Lin, N., Zhang, W., Wang, Y., You, Q., Liu, Z., ... & Lin, H. Development of titanium-based positive grids for lead acid batteries with enhanced lightweight, corrosion resistance and lifetime. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73:108880.
- [6] Yang, T., Qian, S., Luo, Y., Wang, X., & Wang, Z. Direct re-usability of lead-plated tin bronze as negative plate for lightweight lead-acid battery. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2021; 18(3): 030906.
- [7] Zhang, Y., Zhou, C. G., Yan, X. H., Gao, H. L., Gao, K. Z., & Cao, Y. Synthesis of Nafion-reduced graphene oxide/polyaniline as novel positive electrode additives for high performance lead-acid batteries. *Electrochimica Acta*. 2023;466: 143045.
- [8] Chen, Z., Cao, J., Rao, Y., An, L., Yang, Y., Zhou, S., & Wu, L. Monosodium glutamate as an effective electrolyte additive in lead acid battery. *Electrochimica Acta*. 2023; 458: 142492.
- [9] Romero, A. F., Tomey, R., Ocón, P., Valenciano, J., & Fricke, H. Improvement of positive plate grid corrosion resistance through two methods of boric acid addition to lead-acid battery electrolyte. *Journal of Energy Storage* 2023; 72: 108302.
- [10] Yanamandra, K., Pinisetty, D., & Gupta, N. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 173: 113078.
- [11] Chen, Z., Li, J., Yu, J., Wu, L., Zhou, S., Rao, Y., & Cao, J. The critical role of aluminum sulfate as electrolyte additive on the electrochemical performance of lead-acid battery. *Electrochimica Acta*. 2022; 407: 139877.
- [12] Göçmen, S. Numerical and experimental investigations of an air-cooled battery thermal management system, Yüksek Lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2021.
- [13] Celen, A., Kaba, M. Y. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2021; 33(1): 49-61.

- [14] Çetin, İ., Sezici, E., Karabulut, M., Avci, E., & Polat, F. A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023; 237(3): 989-1004.
- [15] Wu, Y., Liu, Z., Liu, J., Xiao, H., Liu, R., & Zhang, L. Optimal battery capacity of grid-connected PV-battery systems considering battery degradation. *Renewable Energy*. 2022; 181: 10-23.
- [16] Chen, K., Wu, W., Yuan, F., Chen, L., & Wang, S. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern. *Energy*. 2019; 167: 781-790.
- [17] Sezici, E., Cetin, I., & Polat, F. Design and Experimental Investigation of Air-Cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Journal of Engineering Research and Applied Science*. 2022; 11(2): 2062-2077.
- [18] Ye, B., Rubel, M. R. H., & Li, H. Design and optimization of cooling plate for battery module of an electric vehicle. *Applied sciences*. 2019; 9(4): 754.
- [19] Dong, S., Lv, J., Wang, K., Li, W., & Tian, Y. Design and optimization for a new locomotive power battery box. *Sustainability*. 2022; 14(19): 12810.
- [20] Akinlabi, A. H., & Solyali, D. Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 125: 109815.
- [21] Tajik, M., Makui, A., & Tosarkani, B. M. Sustainable cathode material selection in lithium-ion batteries using a novel hybrid multi-criteria decision-making. *Journal of Energy Storage*. 2023; 66:, 107089.
- [22] Brauers, W. K. M., E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and T. Vilutiene. Multi Objective Contractor's Ranking by Applying the Moora Method. *Journal of Business Economics and Management*. 2008; 9 (4): 245–255.
- [23] İç, Y. T., and S. Yıldırım. Improvement of a Product Design Using Multi Criteria Decision Making Methods with Taguchi Method.” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2012; 27 (2): 447–458.

Yeni Nesil Buz Makinesinin Termoelektrik Modülünün TEPASLA Araştırılması / Investigation of Thermoelectric Module of Next Generation Ice Machine with TEPAS

Raşit AHISKA¹, Günay ÖMER², Büşra SAYIN^{*1}

¹Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, Ankara, Turkey

²Ankara Medipol University, Vocational School of Health Services, Radiotherapy Program, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Research article
Received: 20/10/2023
Revision: 10/12/2023
Accepted: 19/12/2023

Anahtar Kelimeler

Yeni buz makinesi
Termoelektrik modül
TEPAS

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2023
Düzeltilme: 10/12/2023
Kabul: 19/12/2023

Keywords

New ice machine
Thermoelectric module
TEPAS

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

TEBM'de buz yapma sürelerini test etmek için buz haznesine 10 gr su konulmuştur ve buz yapma süreleri sırasıyla 2, 3, 4, 5 A uygulanarak ölçülmüştür. Elde edilen bulgular Şekil A'da gösterilmektedir. 10 g su 4,83 dakikada buza dönüşürken, Q_c 5,20 A akımda 56,8 W olarak ölçülmüştür. Ölçümler 24 °C ortam sıcaklığında yapılmıştır. / In order to test ice making times in TEIM, 10 g of water was in the ice chamber and ice making times were measured by applying 2, 3, 4, 5 A respectively. The findings obtained are shown in Figure A. 10 g of water turned into ice in 4.83 minutes while the Q_c was measured as 56.8 W at a current of 5.20 A. The measurements were made at an ambient temperature of 24 °C.

I(A)	V(V)	Q_c (W)	t(min)
2.1	5.95	33.1	8.3
2.9	9.1	44.8	6.13
4	11.7	54.3	5.05
5.2	15.1	56.8	4.83

Şekil A. Deneysel veriler / Figure A. Experimental data

Önemli noktalar (Highlights)

- Yeşil teknoloji / Green technology
- Termoelektrik soğutucu / Thermoelectric cooling
- Enerji ve su tasarrufu / Electricity and water saving

Amaç (Aim): Bu çalışmada dünyada ilk kez TES Termoelektrik Ltd. Şti. tarafından üretilen Türk patentli (Patent No: 2014-14588) termoelektrik buz makinesinin parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik araştırma yapılmıştır. / In this study, research was carried out to improve the parameters of the Turkish patented (Patent No: 2014-14588) thermoelectric ice machine, which was produced for the first time in the world by TES Thermoelectric Ltd.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgün yönü kullanılan termoelektrik buz makinesinin patentli olmasının yanı sıra bu ürünün parametrelerinin incelenmesi için geliştirilen yeni yöntem ve TEPAS'ın kullanılmış olması gösterilebilir. / The unique aspect of the study is that the thermoelectric ice machine used is patented, as well as the new method and TEPAS developed to examine the parameters of this product.

Bulgular (Results): Elde edilen deneysel sonuçların hata sınırları dahilinde teorik hesaplama sonuçlarıyla aynı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada yeni ölçüm yöntemiyle çalışan TEPAS sisteminin yüksek performansı gözlemlenmiştir. / It has been determined that the experimental results obtained are the same as the theoretical calculation results within the error limits. Also, the high performance of the TEPAS system operating with the new measurement method was observed in this study.

Sonuç (Conclusion): Dünya çapında patenti ve altın madalyası bulunan bu buluş, yalnızca çevre, enerji ve su sorunlarını çözmedi. Aynı zamanda insanın buz tüketimi ve üretimine yönelik yeni bir konsept ve çözüm önerisi ortaya koymuştur. / This invention, which has a worldwide patent and a gold medal, has not only solved the environmental, energy and water problems. At the same time, it has introduced a new concept and solution proposal for human ice consumption and production.



Yeni Nesil Buz Makinesinin Termoelektrik Modülünün TEPASLA Araştırılması

Raşit AHISKA¹, Günay ÖMER², Büşra SAYIN*¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

²Ankara Medipol Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 06050, Radyoterapi Programı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 20/10/2023
Revision: 10/12/2023
Accepted: 19/12/2023

Anahtar Kelimeler

Yeni buz makinesi
Termoelektrik modül
TEPAS

Öz

Çevre kirliliği, temiz içme suyunun ve enerjinin yetersizliği günümüzün en önemli sorunlardır. Artan nüfus ile beraber enerji ve temiz içme suyu ihtiyacı da artmıştır. Bunun yanında artan endüstrileşme sonucu meydana gelen atıklarla çevre kirliliği de artmaktadır. Isıtma, soğutma ve enerji üretme alanlarına çözüm getirecek teknolojilerden biri termoelektrik (TE) teknolojisidir. Ayrıca çevre kirliliğine yol açmaması termoelektrik teknolojileri öne çıkarmaktadır. Termoelektrik soğutma sanayisini oluşturan buz makinelerinin parametrelerinin iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu tip araştırmalar için buz makinelerinin özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dünyada ilk kez TES Termoelektrik Ltd. Şirketinde üretilen Türk patentli (Patent No:2014-14588) termoelektrik buz makinesinin parametrelerini iyileştirmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Bunun için elektrik ve su tasarruflu, çevre dostu ve ısı borulu termoelektrik buz makinesinin (TEBM) deneysel olarak bütün parametreleri incelenmiştir. Dünyada patenti altın madalya almış olan bu buluş, sadece çevre, enerji ve su sorunlarını çözmemiş aynı zamanda insanlığın buz tüketimi ve üretimi konusunda yeni bir kavram alanı ve çözüm önerisi getirmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların hata sınırları içinde teorik hesaplama sonuçlarıyla aynı olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of Thermoelectric Module of Next Generation Ice Machine with TEPAS

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2023
Düzeltilme: 10/12/2023
Kabul: 19/12/2023

Keywords

New ice machine
Thermoelectric module
TEPAS

Abstract

Environmental pollution, inadequacy of clean drinking water and energy are the most important problems of our time. With the increasing population, the need for energy and clean drinking water has also increased. In addition, environmental pollution is increasing with the wastes generated as a result of increasing industrialization. Thermoelectric (TE) technology is one of the technologies that will bring solutions to the fields of heating, cooling and energy production. In addition, the fact that it does not cause environmental pollution brings thermoelectric technologies to the fore. Studies on improving the parameters of ice machines that make up the thermoelectric cooling industry are increasing day by day. For this type of research, it is necessary to examine the characteristics of ice machines. In this study, TES Thermoelectric Ltd. for the first time in the world. Research has been carried out to improve the parameters of the Turkish patented (Patent No: 2014-14588) thermoelectric ice machine produced in the company. For this, all parameters of the thermoelectric ice machine (TEIM), which is electricity and water efficient, environmentally friendly and with heat pipe, were examined experimentally. This invention, whose patent has received a gold medal in the world, not only solved the environmental, energy and water problems, but also brought a new concept area and solution proposal for the ice consumption and production of human beings. It has been determined that the experimental results obtained are the same as the theoretical calculation results within the error limits.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çağımızın en önemli problemlerinin bazıları enerji, temiz içme suyu ve çevre kirliliğidir. Nüfus ve

sanayileşmedeki artış enerji ve temiz içme suyu ihtiyacını gün geçtikçe artırmaktadır. Enerji üretmenin yanı sıra ısıtma, soğutma amaçlı da kullanılan termoelektrik (TE) teknolojisi bu

sorunlara çözüm olacaktır [1]. Termoelektrik teknolojinin soğutma alanı ile buz yapan buz makinelerinin parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar çoğalmaktadır [2]. Dünyada ilk kez TES Termoelektrik Ltd. Şirketinde üretilen Türk patentli (Patent No:2014-14588) termoelektrik buz makinesinin parametrelerini iyileştirmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır [3]. Yapılan çalışmalarda elektrik ve su tasarruflu, çevre dostu ve ısı borulu termoelektrik buz makinesinin (TEBM) deneysel olarak bütün parametreleri incelenmiştir. Dünyada patenti, altın madalya almış olan bu buluş sadece çevre, enerji ve su sorunlarını çözmeyip buz üretimi konusunda yeni bir kavram ve çözüm önerisi getirmiştir [2-5]. TEBM'nin araştırılması TES Ltd. Şirketinde geliştirilen TEPAS (Termoelektrik Performans Analiz Sistemi) cihazıyla yapılmıştır [6]. Teorik hesaplama

sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında hata sınırları içinde aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Çevre kirliliği günümüzün en önemli sorunuyken, su ve enerji günümüzün en önemli ihtiyaçlarıdır. 1980 yılından beri her yıl su kullanımı %1 artmaktadır. Bu durum sürdürülebilir değildir. Küresel su ihtiyacının 2050 yılına kadar mevcut durumdan %20 ile %30 oranında artması öngörülmektedir [3]. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda su tasarrufu kaçınılmazdır. Bu çalışmada, "ihtiyacın kadar buz yap hayatı (suyu) israf etme" sloganından hareketle enerji ve su tasarruflu, ısı borulu termoelektrik buz makinesi tasarımı ve uygulaması yapıldı. Tasarım ile istenildiğinde otomatik olarak buz yapan tam otomatik bir sistem geliştirildi ve patenti alındı [5-7].



Şekil 1. TEBM' nin yapısı ve genel görüntüsü (Structure and overview of the TEIM)

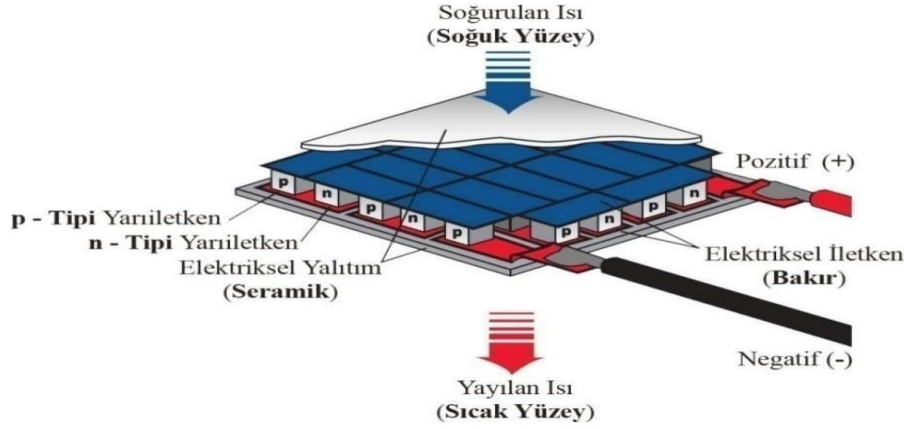
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada Cenevre-2018 46. Uluslararası Buluşlar Fuarında bir Büyük Altın ve 3 ülke Altın Madalya alan TR2014-14588 numaralı patente göre tasarlanmış ve üretilmiş [5]. Masaüstü Termoelektrik Buz Makinesinin tüm termoelektrik parametreleri TEPAS' la araştırılmıştır. Şekil 1'de gösterilen TEBM' nin yapısına bakıldığında cihazın bir kasa, bir adet termoelektrik soğutucu blok (su kap, termoelektrik modül, fanlı ısı borulu ısı transfer sistemi), bir adet DC güç kaynağı, bir adet elektronik su vanası ve cihazı akıllı kılan özel

yazılımla donatılmış, otomatik buz yapan bir adet özel yapım elektronik kontrol sisteminden oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmada cihazın sadece termoelektrik özellikleri değil aynı zamanda cihazda kullanılan ısı borulu ısı transfer sistemi ve DC güç kaynağı incelenmiştir [5-7]. Bu çalışmada termoelektrik modülün ve buz makinesinin termoelektrik özellikleri, yeni yöntem ve test cihazı olan TEPAS ile araştırıldı. Termal yönden paralel, elektriksel yönden seri bağlı N ve P tipi yarı iletkenlerden oluşan termoelementler TE modülleri meydana getirmektedir. Termoelementlerde benzer şekilde paketlenmişlerdir.

TE modülün yapısı Şekil 2’ de gösterilmiştir. Birden fazla termoelementin birleştirilmesiyle farklı boyut ve yapıda üretilen TE modüller Şekil 3’ te gösterilmiştir. TE modül tarafından çekilen en

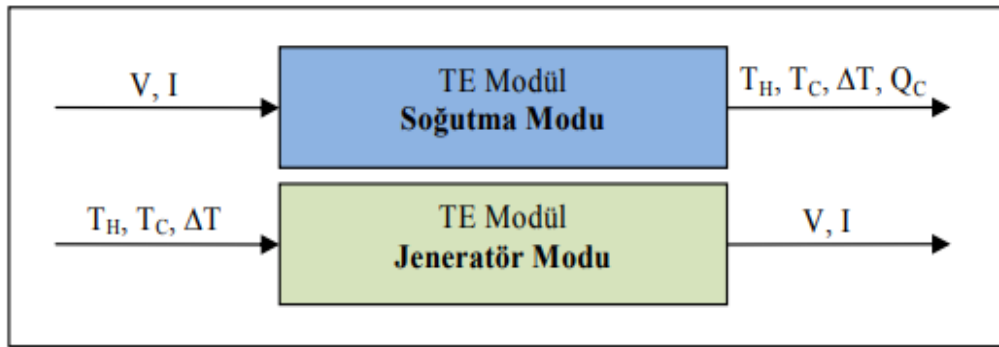
büyük akım (I_{max}) şiddetinin değeri TE yarı iletkenlerin kalitesine, imalat özelliklerine ve büyüklüklerine göre değişmektedir.



Şekil 2. TE modülün yapısı. (Structure of the TE module.)



Şekil 3. Farklı boyut, özellik ve yapıdaki TE modüller. (TE modules of different sizes, features and structures.)



Şekil 4. TE modül giriş ve çıkış parametreleri. (TE module input and output parameters.)

TE modüller hem soğutucu hem de jeneratör olarak çalışabilirler. TE modüller soğutma modunda çalıştığında giriş parametresi gerilim (V) ve akım (I) olurken çıkış parametresi ısınan yüzey (T_H) ve soğuyan yüzey (T_C) arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) olmaktadır. Jeneratör modunda ise giriş ve çıkış

parametreleri soğutma modundakinin tam tersi olmaktadır (Şekil 4). Soğutucu olarak çalışan TE modüllerin çektiği akım ve gerilim değerleri sayesinde elde edilen sıcaklık farkındaki artış modüllerin performansını artıracaktır. Yani yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) veya TE

modülün soğuk yüzeyinden emilen en büyük ısı yükü (Q_C - Soğutma Gücü) TE modülün performansı olarak tanımlanabilir. TE modülün performansı ısı pompalama kapasitesi olarak da ifade edilebilmektedir.

Uygulanan akım, ısınan yüzey sıcaklığı ve soğuyan yüzeye etki eden ısı yük miktarı TE modülde oluşacak sıcaklık farkının belirlenmesinde çok önemlidir. Sıcaklık farkı TE modülün ürettiği termoemk ile doğru orantılıdır. Uygulanan akımın şiddeti TE modül performansı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Çevredeki sıcaklık ve transfer edilen ısı performansına bağlı olan T_H değeri yükseldiğinde TE modülde 'iç ısı yük' etkisi oluşur. Bu etki T_C değerini de arttıracaktır. TE

modüllerin soğutma kapasitelerinin artırılabilmesi için T_H değeri düşük tutulmalıdır. Bu da TE sistemlerde, ısı transfer sistemlerinin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir.

T_H , T_C , ΔT ve Q_C parametreleri TE modüller için oldukça önemlidir. TE yarıiletken ve modüller için TEPAS ile ölçülebilen parametreler Tablo 1' de verilmiştir. TE modüle uygulanan DC akım parametresine bağlı olarak Q_C , Q_H , T_C , T_H , P , COP , K , R , Z çıkış parametreleri ile V_{max} , I_{max} ve E_{max} olarak adlandırılan deneysel parametreleri mevcuttur [6]. TEPAS'ın çalışma prensiplerini oluşturan yeni yöntemin teorisi R. Ahıska tarafından geliştirilmiştir [4-12]. Bu çalışmada teorik hesaplamalar yeni yonteme göre yapılmıştır.

Tablo 1. TEPAS'la ölçülebilen parametreler. (Parameters that can be measured with TEPAS.)

Simge	Birim	Açıklama
COP		TE modül performans katsayısı
E_{max}	V	TE modülün ürettiği termoemk (ΔT_{max} iken)
I_{max}	A	TE modülün çektiği akım (ΔT_{max} iken)
K	$W.K^{-1}$	TE modülün toplam termal iletkenliği
P	W	TE modülün tükettiği güç
Q_C	W	TE modülün soğuk yüzeyinden soğurulan toplam ısı yük
Q_H	W	TE modülün sıcak yüzeyinde açığa çıkan toplam ısı miktarı
Q_L	W	Birim zamanda TE modüle gelen toplam ısı yük
Q_{Cmax}	W	TE modülün maksimum soğutma kapasitesi ($I = I_{max}$ ve $\Delta T = 0$ iken)
R	Ohm	TE modül elektriksel direnci
T_C	K	TE modül soğuk yüzey sıcaklığı
T_H	K	TE modül sıcak yüzey sıcaklığı
V_{max}	V	TE modül gerilimi (ΔT_{max} iken)
Z	K^{-1}	TE modülün kalite katsayısı (Figure-of-merit)
ΔT	K	TE modül yüzeyler arası sıcaklık farkı ($\Delta T = T_H - T_C$)
ΔT_{max}	K	TE modülde elde edilebilecek maksimum sıcaklık farkı ($I = I_{max}$ ve $Q_C = 0$ iken)
K	$Wm^{-1}K^{-1}$	TE yarıiletkenin termal iletkenliği
A	VK^{-1}	TE yarıiletkenin Seebeck katsayısı
P	Ohm.cm	TE yarıiletkenin öz direnci
Z	K^{-1}	TE yarıiletken kalite katsayısı

Yeni yöntemin temelini oluşturan formüller aşağıda verilmiştir. Test edilen buz makinesinde tek bir 4x4 cm'lik termoelektrik modül kullandığından modülün parametreleri buz makinesinin parametrelerini oluşturmaktadır. Buna göre modülün Watt olarak Q_C ve Q_H

$$Q_C = V_{\max} I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left[I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \right] E \quad (1)$$

$$Q_H = V_{\max} I + \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max} E}{E_{\max}} \quad (1)$$

Eş. 1 ile bulunabilirler.

Modülün tükettiği güç Eş. 2 ile hesaplanabilir:

$$P = \frac{I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + E I \quad (2)$$

Buradan modülün verimi,

$$COP = \frac{Q_C}{P} = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left[I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \right] E}{\frac{I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + IE} \quad (3)$$

Eş. 3 ile bulunabilir. Bunlara ek olarak modülün Z parametresi

$$Z = \frac{V_{\max} E_{\max}}{0,5(V_{\max} - E_{\max})^2 T_H} \quad (4)$$

Eş. 4 ile yazılabilir.

Buz makinesine kullanılan modülün herhangi bir yüzeyindeki sıcaklığın ölçülmesi, termokupların TE modülün üzerine konulması ve çıkışlarının da dışarıya çıkarılması ile yapılabilmektedir. Bu ölçüm oldukça zordur. Ne var ki modülün sıcak yüzeyinin sıcaklığı T_H 'nin ölçülmesi dışarda olduğundan oldukça kolaydır.

Modülün yüzeylerindeki soğuk ve sıcak yüzeylerin sıcaklıkları T_C ve T_H için yeni teoriye göre,

$$T_C = T_H \left(1 - \frac{E}{V_{\max}} \right) \quad (5)$$

$$T_H = \frac{T_C}{\left(1 - \frac{E}{V_{\max}} \right)} \quad (6)$$

eşitlikleri yazılabilir. Doğrudan ölçülmesi zor olan T_C sıcaklığının, T_H ve E değerlerinin ölçülmesi ile bulunabilir olduğunu Şekil 5 göstermektedir. Aynı denklemde T_H tek bırakılarak Eş. 6 elde edilir. Burada da T_C ve E (değerlerini kullanarak T_H bulunabilir.

Termoemk E 'nin değişik akımlardaki Q_C 'ye göre değişimi ise Eşitlik 7 ile ifade edilecektir:

$$E = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - Q_C}{I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}}} \quad (7)$$

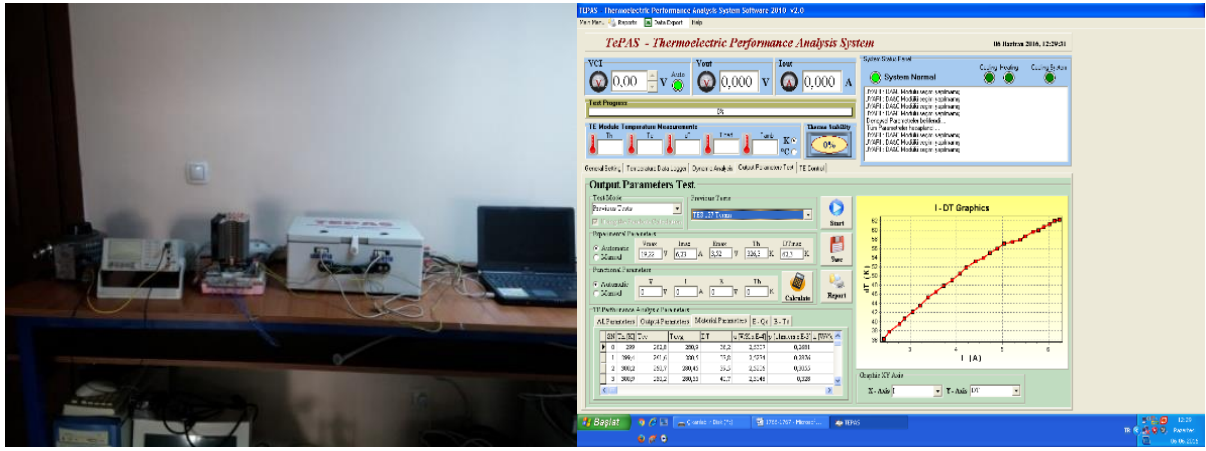
Elde edilen (1)-(7) eşitlikleri, çalışan modülün o andaki tüm parametrelerini (3) vermektir. Eşitliklerin hesaplanabilmesi adına farklı modüller için farklılık gösteren I_{\max} , V_{\max} ve E_{\max} değerleri bulunmalıdır. Bu nedenle bu parametrelere modülün deneysel parametreleri denebilir. T_C veya T_H sıcaklıklarından yalnız birinin ölçülmesi de eşitliklerin kullanımı için gereklidir. TE modüldeki yarı iletkenlerin geometrik özelliklerine bağlı olmayan V_{\max} ve E_{\max} , modülün makro büyüklükleri olarak adlandırılır. Bu nicelikler oldukça kolay bir şekilde ve büyük hassasiyetle ölçülebilirler. Sonuç olarak çalışan modül tarafından çekilen I akımının, modülün uçlarına düşen V geriliminin, modülün ürettiği termoemk E 'nin ve herhangi bir yüzeyindeki sıcaklığının ölçülmesi, modülün dinamik ısı ve elektriksel özelliklerinin araştırılması için kafidir. Bunlara ek olarak bu formüller, modüllerin malzemelerinin kalitesinin ölçüsü olabilecektir. Bununla birlikte ölçümler kolay ve hassas yapılabilirler. Bu yöntemin maliyet bakımından düşük olduğu tartışılmazdır [13-15].

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışmalarımızda ölçüm için kullanılan TEPAS'ın iç ve dış görünümünün bilgisayar alıntısı Şekil 5'te verilmiştir. Termoelektrik buz makinesinin veya makinesinin termoelektrik bloğunun testi için Şekil 6'daki düzenek kuruldu.



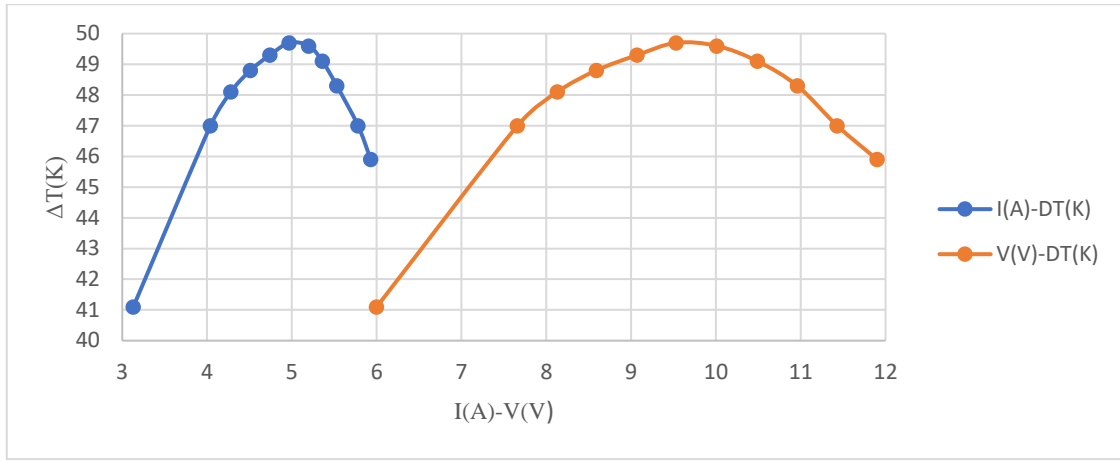
Şekil 5. TEPAS'ın görünümü (TEPAS's view)



Şekil 6. TEBM veya TE bloğun TEPAS' lı test düzeneği (Test setup of TEIM or TE block with TEPAS)

Tablo 2. T_{Cmin} rejiminde, termoelektrik bloğun çıkış parametrelerinin akım ve gerilime göre değişimi (Variation of output parameters of thermoelectric block according to current and voltage in T_{Cmin} regime)

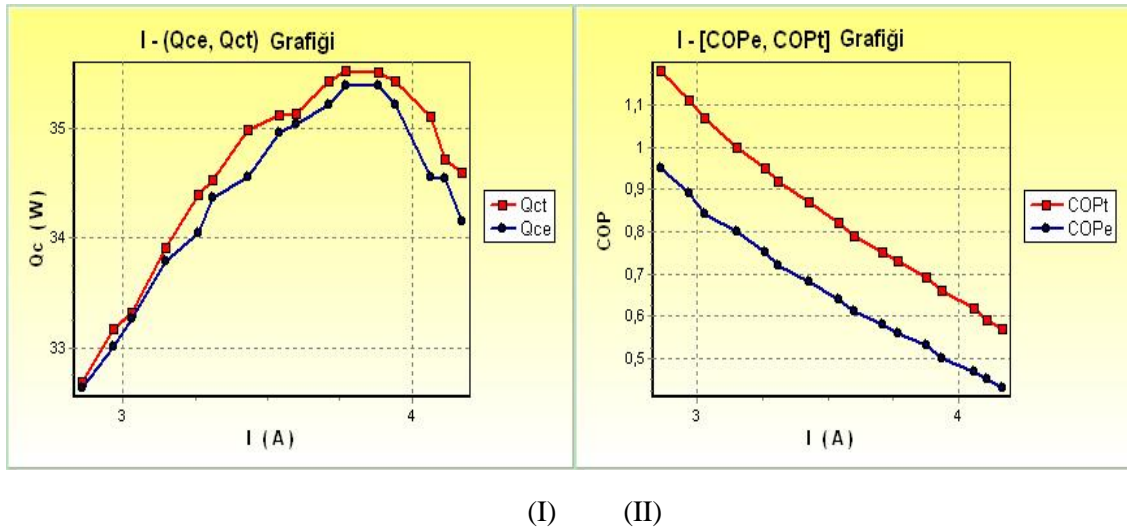
I (A)	V (V)	T_H (K)	T_C (K)	ΔT (K)	E (V)
3,13	6,00	304,8	263,7	41,1	1,28
4,04	7,66	307,7	260,7	47,0	1,52
4,28	8,13	308,6	260,5	48,1	1,50
4,51	8,59	309,4	260,6	48,8	1,62
4,74	9,07	310,6	261,3	49,3	1,66
4,97	9,53	311,8	262,1	49,7	1,68
5,20	10,01	313,0	263,4	49,6	1,73
5,36	10,49	314,3	265,2	49,1	1,75
5,53	10,96	315,4	267,1	48,3	1,74
5,78	11,43	316,2	269,2	47,0	1,77
5,93	11,9	317,1	271,2	45,9	1,81



Şekil 7. TEBM veya TE bloğun akım ve gerilime bağlı sıcaklık değişimleri (Temperature changes of TEIM or TE block depending on current and voltage)

TEPAS ile yapılan ölçümlerde modülün parametreleri $\Delta T_{max}=62,3$ °C, $I_{max} = 6,23$ A, $V_{max} = 19,22$ V, $E_{max} = 3,52$ V, $P = I_{max} * V_{max} = 120$ W

olarak ölçülmüştür. TEPAS ile elde edilen birçok verilerden birkaç örnek sonuçlar Tablo 2 ve Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 8. TEBM veya TE bloğun Q_{Cmax} rejimdeki (I) Q_C ve (II) COP’un I’ya göre değişimi (Change of (I) Q_C and (II) COP of TEIM or TE block in Q_{Cmax} regimen compared to I)

Tablo 3. TE modül ile TE sistem parametrelerinin karşılaştırılması (Comparison between TE module and TE system parameters)

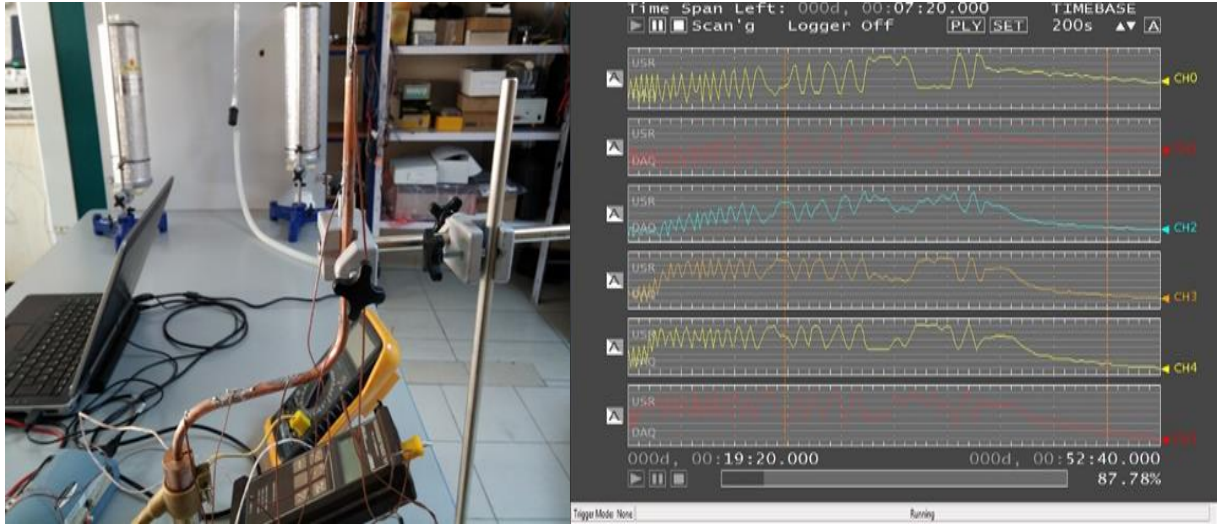
Özellik	TEBM (CP1.4-127-10)		TEBM (TEC1-12705)	
	TEPAS	Üretici Kataloğu	TEPAS	Üretici Kataloğu
ΔT_{max} (°C)	57,6	68	49,6	66
I_{max} (A)	3,92	3,9	4,99	5,3
V_{max} (V)	17,32	15,40	9,53	14,2

$E_{max}(V)$	3,09	-	1,68	-
$Q_{Cmax}(W)$	31,6	33,40	37,8	43
$R(\Omega)$	3,46	3,44	1,59	2,40

TEPAS ile yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin bilgisayar alıntısı Şekil 8’de verilmiştir [16]. Burada Q_{Ce} deneysel Q_{Ct} teorik sonuçları ifade etmektedir. Bu iki değer birbirine çok yakın olduğundan TEPAS’ın en fazla %5’lik bir hataya ölçüm yaptığı görülmüştür. Aynı sonuç TEBM’de kullanılan sırasıyla CP1.4-127-10 ve TEC1-12705 model TE modülleri TEBM’ de kullanılmıştır. Bu modüllerin TEPAS ile elde edilen parametreleri ile Bu çalışmada termoelektrik buz makinesinin termoelektrik modülden sonra en önemli elemanı olan ısı borulu ısı transfer sistemi araştırıldı. TEBM’ de kullanılan modülün $Q_{Cmax} = 50 W$ ve $Q_H = 100 W$ olduğuna göre Şekil 1’de gösterilen fanlı ısı borulu sistem her biri 20 W olan 6 adet paralel bağlı ısı borulardan üretilmiştir. Bu sistemin toplam

üretici katalog verileri karşılaştırılmıştır (Tablo 3). Tablo 3’ de görüldüğü üzere çalışan TE modüllerin parametreleri farklıdır. TE sistemin tasarımı, yalıtımı, ısı transfer sisteminin performansı bu farklılığın oluşum sebeplerindedir. Bu farkın bir diğer sebebi ise TE modülün yapısındaki termoelektrik yarı iletkenlerin özelliklerinin, çalışma durumunda farklılık göstermesidir [6].

ısı atma kapasitesi 120 W olup TEBM’ de kullanılan modülün yüzeyler arasında meydana getirdiği sıcaklık farkı en az 50 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer çevre sıcaklığı 25 °C iken tespit edilmiştir. Şekil 9’da tek bir ısı borunun test düzeneği ve özel sıcaklık ölçüm sistemiyle elde edilen sonuçların bilgisayar alıntısı verilmiştir.



Şekil 9. TEBM kullanılan ısı boru test düzeneği (Heat pipe test mechanism used in TEIM)

Burada ısı borunun ortalama ısı direnç $R=(T_5-T_1)/P(W)=1,42$ °C/W olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada termoelektrik buz makinesinin termoelektrik modül ve ısı borulu ısı transfer sistemden sonra en önemli elemanı SMPS DC güç

kaynağı incelenmiştir. TEBM’de kullanılan Proline 2420 Battery Changer 24 VDC- 20 A güç kaynağının parametrelerini ölçmek için Şekil 10’daki düzenek kullanılmıştır.



Şekil 10. *TEBM kullanılan güç kaynağı (TEIM used power supply)*

Burada DC Wattmetre ile yapılan ölçümlerde; 4,90 A- 13,8 V- 66,5 W- 0,7 Wh- 1,3 Vh-12,98 Vm-0,07 Ah- 75,4 Wp değerleri ölçülmüştür. Buna göre TEBM' de kullanılan termoelektrik modülün aldığı

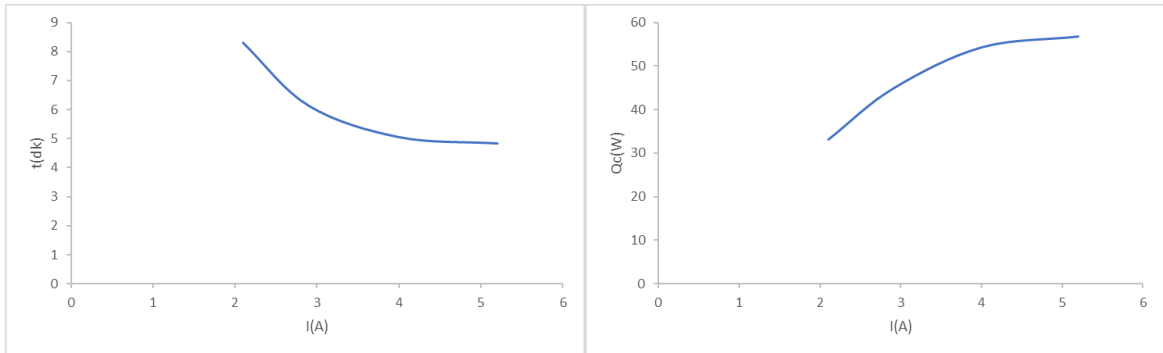
güç 66,5 W iken TEBM'nin tükettiği toplam güç 80 W' ı geçmemiştir. Bu sonuçlar TEBM'nin ne kadar enerji tasarruflu olduğunu göstermektedir.

TEBM' de buz yapma sürelerini test etmek için 10 g su buz haznesinde iken sırası ile 2, 3, 4, 5 A uygulanarak buz yapma süreleri ölçüldü. Elde

edilen ölçümler Tablo 4'de gösterildi. Akıma bağlı Q_c ve t süreleri grafik olarak Şekil 10'da gösterildi.

Tablo 4. *Deneysel veriler (experimental data)*

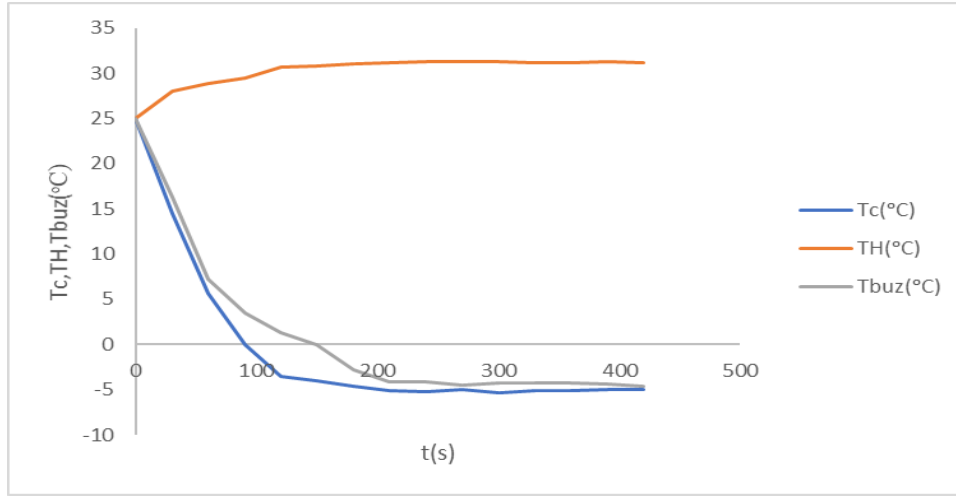
I (A)	V (V)	Q_c (W)	t (dk)
2,2	5,95	33,2	8,3
2,9	9,1	44,8	6,13
4	11,7	54,3	5,05
5,2	15,1	56,8	4,83



Şekil 11. *I- Q_c ve I-t grafikleri (I- Q_c and I-t graphics)*

Grafikler incelendiğinde 5,2 A akımda $Q_C=56,8$ W olarak ölçülürken 4,83 dakikada 10 g suyun buz haline geldiği görüldü. Ölçümler 24 °C çevre sıcaklığında yapıldı. Akım değeri arttıkça Q_C

değerleri artarken buz yapma süreleri azalmaktadır. Ayrıca Şekil 12’de T_C , T_H ve T_{buz} (buzun sıcaklığı) zaman grafikleri verilmiştir.



Şekil 12. T_C , T_H ve T_{buz} zaman grafikleri. (T_C , T_H and T_{ice} time graphics)

Ayrıca TEBM' nin buz üretimini gösteren resim Şekil 13'te verilmiştir [17].



Şekil 13. TEBM ürettiği buzlar [17]. (The ice produced by TEIM [17].)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Isıtma, soğutma ve enerji üretme amaçlı termoelektrik (TE) teknolojisi artan temiz içme suyu ve enerji ihtiyaçlarının giderilmesinde çözüm olacaktır. Çevreye dost olmasının yanında, su ve enerji tasarrufu sağlaması TE teknolojileri öne çıkarmaktadır. Dünyada termoelektrik soğutma sanayisini oluşturan buz makinelerinin parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan

çalışmalar artmaktadır. Çalışmamızda dünyada ilk kez TES Termoelektrik Ltd. Şirketinde üretilen Türk patentli (Patent No:2014-14588) termoelektrik buz makinesinin parametrelerini iyileştirmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Bunun için, elektrik ve su tasarruflu, çevre dostu, ısı borulu termoelektrik buz makinesinin (TEBM) deneysel olarak bütün parametreleri ileri teknoloji ve inovatif

ürün olan TEPAS ile incelenmiştir. Dünyada patenti, altın madalya almış olan bu buluş sadece çevre, enerji ve su sorunlarını çözmüştür. Aynı zamanda insanoğlunun buz tüketimi ve üretimi konusunda yeni bir kavram ve çözüm önerisi getirmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar hata sınırları içinde teorik hesaplama sonuçlarıyla aynı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada yeni ölçüm yöntemiyle çalışan TEPAS sisteminin yüksek performansı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre TEBM, bir bardak içeceği soğutmak için gerekli olan 10 g buz en fazla 5 dakikada yapmaktadır. Bu surede makinenin harcadığı elektrik enerji sadece $15,1 \text{ V} \times 5,2 \text{ A} = 0,075 \text{ kW}$ olmuştur. Oda sıcaklığında (ortalama $25 \text{ }^\circ\text{C}$) bulunan 10 g suyu 5 dakikada buza dönüştürmek için suya $49,12 \text{ W}$ 'lık bir ısıl yük aktarmak gerekmektedir. Buna göre TEBM' de özel modül seçilmiş ve yüklü iken soğutma kapasitesi $56,8 \text{ W}$ olmuştur. TEBM' de dünyada ilk kez termoelektrik teknolojiyle ısı boru (heat pipe) teknolojisi bir araya

getirilmiştir. Termoelektrik modülün ısınan yüzeyini soğutmak (oda sıcaklığında tutmak) için özel ısı borulu soğutma sistemi yapılmıştır ve test edilmiş. Buzu hızla yapabilmek için her biri 20 W 'lık ısıl gücü atabilen içi özel işlenmiş bakır borulara özel şekil verilerek toplam 6 borudan oluşan özel bir ısı transfer sistemi üretilmiştir. TEBM' de kullanılan fanlı ısı borulu ısı transfer sisteminin gücü 120 W olup modülde medya getirdiği sıcaklık farkı $50 \text{ }^\circ\text{C}$ olmuştur. TEBM' de kullanılan özel SMPS DC güç kaynağının, amaca uygun yüksek verimli ve yüksek güvenilirlikte olması sağlanmıştır. Buz makinesini akıllı, daha verimli ve elektrik tasarruflu kılmak için TEBM' de PID özel sıcaklık kontrol sistemi kullanılmıştır. Bu kontrol sistemini akıllı kılmak için ise TEBM' de ATMEGA328 tabanlı özel bir yazılım geliştirilmiştir. Sonuç olarak teori ile deneysel çalışmalar arasındaki ortalama hata payı soğutma performansı üzerinde yapılan hesaplamalarda dört akım değeri için %2,4 olarak hesaplandı.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FYL/2023-8540

This study was supported by Gazi University BAP project.
Project No.: FYL/2023-8540

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Günay Ömer (2023). Earth Air Thermoelectric Generators, GU J Sci, Part C, 11(3), 804-812.

[2] A. Rodríguez, J.G. Vián, D. Astrain, (2009). Development and experimental validation of a computational model in order to simulate ice cube production in a thermoelectric ice-maker. Applied Thermal Engineering 29, 2961–2969.

[3] Ye Liu, Xueli Wang, Xiao Liu, Jianlin Yu, Hongkui Ma, (2022). Experimental research on a semiconductor freezer utilizing two-stage thermoelectric modules. Energy Conversion and Management 274, 1-10.

[4] Yan-Wei Gao, Shi Cong-Linga, Wang Xiao-Dong, (2019). Numerical analysis for transient supercooling effect of pulse current shapes on a two-stage thermoelectric cooler. Applied Thermal Engineering ng 163, 1-10.

[5] R. Ahıska, (2014). Patent No: TR 2014-14588.

[6] S. Dislitas, (2009). Bilgisayar Kontrollü Termoelektrik Performans Analiz Sistemi, Doktora Tezi, Ankara.

[7] Yavuz H., Omer G. (2022). Heat Pipe Thermoelectric Ice Machine Design: For Water and Energy Saving, Emerging Materials Research 35 (4), 3-15.

[8] Ahıska, R., Ahıska, K., (2010). New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules, Energy Conversion and Management, 51, 338-345.

[9] R. Ahıska, G. Ahıska, K. Ahıska, (2009). Analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric module employed in medical cooler for renal hypothermia, Instrumentation Science & Technology, 37 (1), 102-123.

- [10] Ahıska, R., (2009). Comparing analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric modules, XIII International Forum on Thermoelectricity, Ukraine, 28-36.
- [11] R. Ahıska, (2005). The study of thermoemf effect on exit parameters of thermoelectric modules, International Conference Fizika, Azerbaijan, 144-148.
- [12] Ahıska, R., (2008). New method for studying parameters of a thermopile, Journal of Thermoelectricity, 3, 71-82.
- [13] Ahıska, R., (2007). New method for investigation of dynamic parameters of thermoelectric modules, Turk J Elec Engin, 15 (1), 51-65.
- [14] Ahıska, R., (2007). New method for study dynamic exit properties of thermoelectric modules, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., 22 (4), 709-716.
- [15] Ahıska, R., and et. (2004). Standart termoelektrik modülün Z parametresinin ölçülmesi için yeni yöntem ve yeni sistem, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 19 (4), 467-473.
- [16] Ahıska R, Dislitas S, Omer G, (2012). A new method and computer-controlled system for measuring the time constant of real thermoelectric modules. Energy Conversion and Management, 53, 314-321.
- [17] TES Ltd, (2023). Web: testthermoelectric.com,, Ankara.

Experimental Investigation of the Effects of E85 and Gasoline on NO Emission in a Spark Ignition Engine

Mustafa Ceyhun ERKOCA^{1*}  Tolga TOPGÜL² 

¹Kütahya Dumlupınar University, Kütahya Vocational School of Technical Sciences, Kütahya, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 27/07/2023
Revision: 26/08/2023
Accepted: 28/08/2023

Keywords

Spark Ignition Engine
Alternative Fuel
E85
Engine Performance
NO Emission

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/07/2023
Düzeltilme: 26/08/2023
Kabul: 28/08/2023

Anahtar Kelimeler

Buji ile Ateşlemeli
Motor
Alternatif Yakıt
E85
Motor Performansı
NO Emisyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of E85 and gasoline on NO and BSNO emissions have been investigated experimentally by considering ignition timing and relative air/fuel ratio in a spark ignition engine. / Bu çalışmada, bir buji ile ateşlemeli motorda ateşleme zamanı ve hava fazlalık katsayısı dikkate alınarak E85 ve benzinin NO ve özgül NO emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.



Figure A: Experimental setup and BSNO / Şekil A: Deneysel düzenek ve özgül NO

Highlights (Önemli noktalar)

- According to all experimental data, the gravimetric fuel consumption and BSFC for E85 compared to gasoline increased on average by 39.3% and 37.5%, respectively. / Tüm deneysel verilere göre, benzine kıyasla E85 için kütleli yakıt tüketimi ve FÖYT sırasıyla ortalama %39,3 ve %37,5 arttı.
- An average of 37.5% reduction at the values of the 1.05 and 1.1 RAFR where the NO emission peaks, in general, were obtained in E85 fuel compared to gasoline. / E85 yakıtında genel olarak NO emisyonunun pik yaptığı 1,05 ve 1,1 HFK değerlerinde benzine göre ortalama %37,5 azalma elde edilmiştir.
- Considering the maximum NO point of 1.05 or 1.1 RAFRs, a 38.4% reduction in BSNO was obtained with E85 compared to gasoline. / Maksimum NO noktası olan 1,05 veya 1,1 HFK değerleri dikkate alındığında, E85 ile benzine kıyasla özgül NO'da %38,4 oranında azalma elde edilmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to experimentally investigate the effect of gasoline and E85 on NO emissions in an SI engine at the same operating conditions. / Bu çalışmanın amacı aynı çalışma koşullarında buji ile ateşlemeli bir motorda benzin ve E85'in NO emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemektir.

Originality (Özgünlük): In this study, the effects of E85 and gasoline on NO emissions at the same operating conditions were investigated experimentally by considering ignition timing and relative air/fuel ratio in a spark ignition engine. / Bu çalışmada, bir buji ile ateşlemeli motorda ateşleme zamanı ve hava fazlalık katsayısı dikkate alınarak aynı çalışma koşullarında E85 ve benzinin NO emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Results (Bulgular): The experimental results showed an overall reduction in NO and BSNO emissions for E85 compared to E0; moreover, in the poor air/fuel mixtures, especially at the values of 1.05 and 1.1 RAFR where the NO emission peaks, the reduction was more significant and considerable. / Deneysel sonuçları, E0'a kıyasla E85 için NO ve özgül NO emisyonlarında genel bir azalma olduğunu gösterdi; ayrıca, fakir hava/yakıt karışımlarında, özellikle NO emisyonunun zirve yaptığı 1,05 ve 1,1 HFK değerlerinde azalmanın daha belirgin ve dikkate değer olduğu görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): Compared to gasoline, despite the increase in gravimetric or volumetric fuel consumption in the usage of E85, the remarkable decrease in NO and specific NO emissions stands out as the main result obtained in the research. / Benzin ile karşılaştırıldığında E85 kullanımında kütleli veya hacimsel yakıt tüketimi artmasına rağmen NO ve özgül NO emisyonlarındaki dikkate değer azalma araştırmada elde edilen temel sonuç olarak göze çarpmaktadır.



Experimental Investigation of the Effects of E85 and Gasoline on NO Emission in a Spark Ignition Engine

Mustafa Ceyhun ERKOCA^{1*} Tolga TOPGÜL²

¹Kütahya Dumlupınar University, Kütahya Vocational School of Technical Sciences, Kütahya, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 27/07/2023
Revision: 26/08/2023
Accepted: 28/08/2023

Keywords

Spark Ignition Engine
Alternative Fuel
E85
Engine Performance
NO Emission

Abstract

Energy need is one of the indispensable needs of human beings. At this point, the important thing is to use the available resource that is sustainable, economical, and sensitive to the ecosystem. For this reason, alternative fuels will maintain their importance in the future as they do today. Internal combustion engines continue to be used as power plants for conventional and hybrid vehicles. The sustainability of internal combustion engines depends on their energy consumption and the emissions released. In this study, the effects of E85 and gasoline on NO emissions have been investigated experimentally by considering ignition timing and relative air/fuel ratio in a spark ignition engine. The experiments have been performed on the Ricardo Hydra research engine at 2000 rpm engine speed and a 10:1 compression ratio. The experimental results show that engine output power obtained using E85 was similar to or higher than that of E0. The exhaust gas temperatures for E85 decreased by an average of 22.6 °C, compared to E0. When all experimental data obtained with E0 and E85 were compared with each other, it was seen that gravimetric fuel consumption and brake specific fuel consumption were increased on average by 39.3% and 37.5%, respectively. The results of this study show that the improvement of E85 in NO emission is remarkable. Considering the maximum NO point at 1.05 or 1.1 relative air/fuel ratio, a 38.4% reduction in brake specific NO was obtained with E85.

Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda E85 ve Benzinin NO Emisyonuna Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/07/2023
Düzeltilme: 26/08/2023
Kabul: 28/08/2023

Anahtar Kelimeler

Buji ile Ateşlemeli Motor
Alternatif Yakıt
E85
Motor Performansı
NO Emisyonu

Öz

Enerji ihtiyacı insanoğlunun vazgeçilmez ihtiyaçlarından biridir. Bu noktada önemli olan elde edilebilir kaynağı sürdürülebilir, ekonomik ve ekosisteme duyarlı kullanmaktır. Bu nedenle alternatif yakıtlar bugün olduğu gibi gelecekte de önemini koruyacaktır. İçten yanmalı motorlar konvansiyonel ve hibrit araçlar için güç kaynağı olarak kullanılmaya devam etmektedir. İçten yanmalı motorların sürdürülebilirliği, enerji tüketimine ve emisyon salınımlarına bağlıdır. Bu çalışmada, bir buji ile ateşlemeli motorda ateşleme zamanı ve hava fazlalık katsayısı dikkate alınarak E85 ve benzinin NO emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, 2000 rpm motor devrinde ve 10:1 sıkıştırma oranında Ricardo Hydra araştırma motorunda gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, E85 kullanılarak elde edilen motor çıkış gücünün E0'inkine benzer veya daha fazla olduğunu göstermektedir. E85 için egzoz gazı sıcaklıkları, E0'a kıyasla ortalama 22,6 °C azaldı. E0 ve E85 ile elde edilen tüm deneysel veriler birbiriyle karşılaştırıldığında, kütleli yakıt tüketiminin ve fren özgül yakıt tüketiminin sırasıyla ortalama %39,3 ve %37,5 arttığı görüldü. Bu çalışmanın sonuçları, özellikle E85'in NO emisyonundaki iyileştirmesinin dikkat çekici olduğunu göstermektedir. 1,05 veya 1,1 hava fazlalık katsayısında maksimum NO noktası dikkate alındığında, E85 ile fren özgül NO emisyonunda %38,4'lük bir azalma elde edildi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Internal combustion engines continue to meet the energy needs of vehicles as stand-alone power plants or in hybrid systems. Diesel and petrol engines have been used for more than 100 years.

During this period, numerous research and development studies have been conducted and continue to be conducted for improving vehicles and these engines. Studies on using alternative fuels in these engines and improving pollutant emissions are among the essential issues that researchers focus

on. Furthermore, as it is today, the most severe problem with internal combustion engines in the future will be the pollutant exhaust emissions caused by combustion.

In this study, ethanol was discussed both as an alternative fuel to gasoline and in terms of its effect on NO emission. There are several studies on ethanol as an alternative fuel in the literature. In various studies in the literature, it can be seen that ethanol and ethanol blends have some prominent features, such as octane rating, heating value, latent heat of vaporization, and stoichiometric air/fuel ratio in terms of their effect on engine performance and exhaust emissions. Some of these properties of gasoline and ethanol, especially relevant to SI engines, are given in Table 1.

Table 1. Some properties of gasoline and ethanol (Benzin ve etanolün bazı özellikleri) [1-5]

Properties	Gasoline	Ethanol
Formula	C ₄ to C ₁₂	C ₂ H ₅ OH
Density, kg/L@20 °C	0.7-0.75	0.789
Lower heating value, MJ/L	30-33	21.1
Latent heat of vaporization, kJ/kg	349	923
Stoichiometric air/fuel ratio	14.7	9
RON	88-98	111
Laminar flame speed, cm/s	33	39
Adiabatic flame temperature, °C	1970	1923
Autoignition temperature, °C	257	423

Generally, compared to gasoline, the higher knock resistance, latent heat of vaporization, and laminar flame speed of ethanol are considered to be advantageous for improving the engine torque and power in SI engines. However, particularly the lower heating value and stoichiometric air/fuel ratio can be considered a disadvantage of ethanol in fuel consumption. These specifications can cause an increase in the volumetric or mass fuel consumption, which depends on engine operating conditions and the amount of ethanol in the blends. These effects can be observed in some studies [6-10] in the literature.

The oxygen content and low stoichiometric air/fuel ratio can also stand out as advantages in improving exhaust emissions. As well as the effects of these specifications depend on engine operating

conditions, especially CO and HC emissions can be decreased. Both emissions peak in the rich mixtures and decrease in lean mixtures. This feature so-called leaning effect allows the engine to run at a leaner mixture than gasoline and provides extra oxygen for combustion. In the literature [11-18], the positive impact of the leaning effect of oxygenated fuels on CO and HC emissions has been mentioned. When it comes to NO_x emissions, it can be stated that NO_x emissions are influenced by temperatures in the combustion chamber besides the air/fuel ratio. At this point, it can be expressed that lower adiabatic flame temperature may be an advantage.

It can be seen that researchers from all over the world have studied the effects of alternative fuels on engine performance and exhaust emissions in the ICEs in literature.

Singh et al. [19] investigated the effects of ethanol/gasoline blends on engine performance and emissions. They used E0, E5, E10, and E20 ethanol/gasoline blends in their study. They achieved up to a 2.5% increase in engine performance and up to a 2.5% decrease in BSECs with ethanol blends. Also, the E20 decreased CO emission and HC emission by 65% and 38%, respectively, but doubled NO_x emissions. Hasan et al. [20] investigated the effect of the combustion chamber geometry and ethanol/gasoline blends on combustion characteristics and exhaust emissions. In this study, the blends contained 10% ethanol and 20% ethanol, using five different compression ratios from 4:1 to 10:1. They expressed that changing the compression ratio influenced NO_x emissions more than other emissions. Also, ethanol blends decreased NO_x emissions owing to a higher heat vaporization rate and a lower adiabatic flame temperature compared to gasoline. Turner et al. [2] stated that as the ethanol ratio in the ethanol/gasoline blend increased, combustion efficiency, engine efficiency, and in-cylinder pressure were higher, CO emissions and NO_x emissions decreased or were similar to gasoline. In their study, it was indicated that these improvements were obtained because of better evaporation, higher laminar flame velocity, and improved combustion. The study by Farrell et al. [21] reported that the burning velocity of ethanol was higher than iso-octane, which is a highly branched alkane. A similar result was obtained by Tian et al. [22]. They found that ethanol had the highest laminar flame speed in their study. Also, it was emphasized that the laminar flame speed of ethanol was approximately 30-40% higher than the 2,5-dimethylfuran (DMF). Furthermore, gasoline was slightly faster than DMF.

The knocking resistance of the ethanol at relatively high compression ratios comes out concerning engine performance. The engine brake torques of gasoline (E0) and ethanol-gasoline blend (E60) were compared in the Ricardo Hydra research engine and Cussons-P8800 type standard engine testbed in an experimental study by Topgül and Yücesu [23]. Also, they researched knocking using Kistler 6121 type piezoelectric pressure transducer and Cussons P4410 engine electronic indicating system. At the operating conditions of 2000 rpm engine speed, 10:1 CR, and $\lambda=1$, normal combustion was observed at 22 °CA ignition timing, but they reported that slight knocking occurred at 24 °CA. When the ignition timing was increased to 36 °CA, they observed intensive knocking on the oscilloscope's screen. Moreover, the researchers found that there was not any knocking at the same engine operating conditions depending on ignition timing for E60. A similar result was found in the study by Kalghatgi et al. [24], which stated having a higher resistance of ethanol to auto-ignition provided a reduction in the possibility of super knock. Sasaki and Nakata [25] obtained that ethanol has the highest pre-ignition temperature at low engine speed.

This paper deals with the NO emission of a spark ignition engine fueled by gasoline and E85. The parameters, which are extremely effective on NO emission, such as the relative air/fuel ratio (RAFR) and the ignition timing (IT) were considered in this experimental study. Ricardo Hydra research engine was used in the experiments since the abovementioned parameters could be adjustable smoothly in this engine. This study aimed to observe the variation in NO emissions associated with these parameters and fuels. In the experiments, it was purposed to obtain the variation of the NO emission under operating conditions based on the stoichiometric air/fuel ratio rather than the leaning effect of the ethanol. In fact, in this comparison, it can be expressed that the amount of heat supplied into the cylinder chamber was considered equal. In addition to NO emission, engine brake power, brake specific fuel consumption (BSFC), brake specific energy consumption (BSEC), and brake thermal efficiency (BTE) were also examined.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

The experimental study was conducted on a single-cylinder, four-stroke, water-cooled, and variable compression ratio Ricardo Hydra research engine. The other specifications of the test engine seen in Fig. 1 are given in Table 2.

The other equipment in the experiments can also be seen in Fig. 1. The experiments were performed at a Cussons P8800 type standard engine testbed consisting of a test engine, an electrical dynamometer, which is a DC machine, a control console, and auxiliary equipment such as engine inlet, cooling, and lubricating oil systems. Engine speed, throttle, ignition timing, fuel injection duration, and other test system controls were made with the help of the control console. Moreover, this console was used for monitoring the engine speed, brake torque, ignition timing, oil pressure, coolant level, system faults, and temperatures such as inlet air temperature, exhaust temperature, oil temperature, and inlet/outlet coolant temperatures.

Table 2. The specifications of the Ricardo Hydra research engine (Ricardo Hydra araştırma motorunun özellikleri)

Type	Overhead camshaft, port fuel injection, and SI engine	
Cylinder dimensions (Bore X Stroke)	80.26 X 88.9 mm	
Compression ratio (Adjustable)	5:1 - 13:1	
Ignition timing (Adjustable)	70° BTDC - 20° ATDC	
Valve timing	Intake	Exhaust
Opens	12° BTDC	56° BBDC
Closes	56° ABDC	12° ATDC

The gravimetric fuel consumption was carried out by using scales Ohaus GT 8000 with an accuracy of 0.1 g and a stopwatch Robic SC-700. A Meriam Z50MC2-4F model laminar flow element with a 0.72% reading accuracy was used to measure the airflow rate and air density. A Sun Gas Analyzer MGA 1500s device was used to measure the concentrations of exhaust emissions. The emission values were collected with the help of the RS-232 connection from the exhaust emission device to the computer.

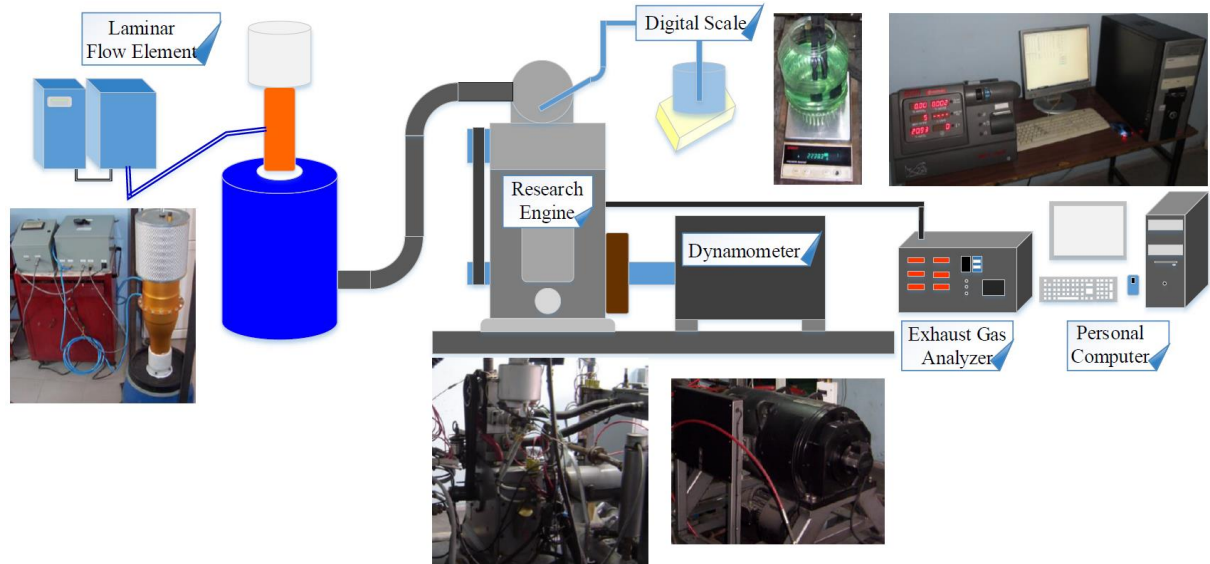


Figure 1. The experimental setup (Deneysel düzenek)

Unleaded gasoline and E85 were used in the experiments as test fuels. The specifications of the unleaded gasoline are given in Table 3 and it is called E0 in this paper. The other test fuel, E85, was prepared as consisting of 85% absolute ethanol (99.5%) and 15% unleaded gasoline by volume. The specifications of each fuel in the blend are seen in Table 3 and 4.

Table 3. The technical specifications of the unleaded gasoline (Kurşunsuz benzinin teknik özellikleri)

Property Item	Method	E0	
Density (kg/m ³ at 15 °C)	TS 6311	772.9	
RVP (kPa)	ASTM D 323	51.9	
Distillation (vol. %)	TS 1232 EN ISO 3405	70 °C	18.7
		100 °C	41.4
		150 °C	87.6
RON	FTIR	96.1	
MON		85.8	

Table 4. The specifications of the ethanol (Etanolün özellikleri)

Property Item	Ethanol
Molecular weight (g)	46.07
Density (g/cm ³)	0,798
Boiling point (°C)	78.5
Flash point (°C)	9-11

The experiments were conducted at a constant load (WOT), 2000 rpm engine speed, and 10:1 compression ratio. The research engine was equipped with variable CR, but CR was adjusted to

10:1 to obtain as much data as possible without knocking specifically for E0. The experiments were performed at different values of the relative air/fuel ratio (0.85-1.2) and the ignition timing (10-26 °CA BTDC). All the tests were performed at the engine working water temperature and oil temperature.

The data from the experimental study contain errors and uncertainties mainly resulting from operators and devices, such as instrument selection, calibration, test procedure, environment, condition, observation, and reading [26, 27].

To verify the accuracy of the experiments, Eq. (1) was used similar to the literature [28-31].

$$w_R = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (1)$$

where w_R is the total uncertainty in the computed value, R is a function of the independent variables x_1, x_2, \dots, x_n and w_1, w_2, \dots, w_n are defined uncertainties related to the independent variables [32, 33]. The uncertainty of the computed results and accuracy of the measurements and are given in Table 5.

Error bars can be used to represent variations in data and experimental uncertainty in an experimental study. For this purpose, error bars were used in studies in the literature. For example, the error bars in the study by Rocha et al. [34] are based on the accuracy of the measuring devices used for data collection.

In each experiment, the data from the control console were recorded three times and the emission

data were acquired five times during the measurement. The averages of each data group are used in the figures of this study. All the figures in this study include error bars based on uncertainty to show the maximum deviation in the data. If error bars are not seen at some points in the figures, this is due to their small values or the vertical scale range of the graph. Also, the difference values obtained from comparing E0 and E85 have been more than the deviation of the measured or computed data in general. This situation can be seen in the figures.

Table 5. Accuracies of the measurements and uncertainty of computed results (Ölçümlerin doğruluğu ve hesaplanan sonuçların belirsizliği)

Measurements	Accuracy
Speed (rpm)	±2
Torque (Nm)	±0.1
Time (s)	±0.5%
Fuel (g)	±0.1
Temperatures (°C)	±1
Heating value (kJ/kg)	±1%
Air flow (g/h)	±0.72%
NO (ppm)	±5%
Computed results	Uncertainty (%)
Engine power	0.75
Fuel flow rate	0.83
BSFC	1.12
Total heat input	1.3
BTE	1.5
BSEC	1.5
RAFR*	1.1
BSNO	5.1

* RAFR (λ) is defined as the actual air/fuel ratio to the stoichiometric air/fuel ratio.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS (BULGULAR VE TARTIŞMA)

The variations of the NO emission versus RAFR and IT are given in Fig. 2. As seen in the figure, NO emission reaches a peak value at a leaner air/fuel ratio from the stoichiometric mixture and it also increases depending on the increase in ignition timing. It can also be seen that the variation trends are the same for both test fuels.

The term nitrogen oxides (NO_x) is more commonly known as nitrogen oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO₂); however, primarily NO stands out in SI engines [35, 36]. Approximately 90-98% of all NO_x

emissions during engine operation are due to NO emissions [37, 38]. The formation of nitrogen oxide primarily depends on peak temperature and oxygen concentration. NO reaches the highest value at an air/fuel ratio slightly lean from the stoichiometric air/fuel ratio because of the sufficient oxygen and higher combustion temperature [36-39].

Most of the NO emission formation, except for lean air/fuel ratios at low temperatures, can be explained by the extended Zeldovich mechanism. The first and second reactions (Eq. 2 and 3) gain importance in the lean and slightly rich air/fuel mixtures over the temperature of 1500 °C. Eq. (4) becomes prominent regarding rich mixtures [35, 40, 41].



Heywood [35] has expressed the initial NO formation rate as seen in Eq. (5) in addition to these NO formation mechanisms.

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6 \cdot 10^{16}}{T^{0.5}} \cdot \exp\left(\frac{-69090}{T}\right) \cdot [O_2]_e^{0.5} \cdot [N_2]_e \quad (5)$$

The exponential term in the last equation depends strongly on the temperature. As a result, high temperatures and amounts of oxygen lead to high NO formation rates [35]. Briefly, all engine-related parameters that support these reactions can influence the formation of the nitrogen oxides, such as air/fuel ratio, ignition timing, compression ratio, engine load, inlet air temperature, and fuel type [37, 38, 40].

When an overall assessment is made, it can be stated that the variation in the NO emission in Fig. 2 is a usual situation. When the air/fuel ratio effect on the formation of the nitrogen oxides is considered, it can be expressed that nitrogen oxides reach a peak value at $\lambda=1.05-1.1$ [36, 38]. Concerning ignition timing, it can be stated that retarding ignition timing increases the exhaust gas temperature, which decreases the peak combustion temperature. Because of this, nitrogen oxides reduce [38, 42].

According to the effect of the fuel type, an overall reduction in NO emissions for E85 compared to E0 can be noticed when Fig. 2 is analyzed. This reduction in NO emission is more apparent and considerable in the poor air/fuel mixtures. An average of 37.5% reduction at the values of the 1.05 and 1.1 RAFR where the NO emission peaks, in

general, were obtained in E85 fuel compared to that of gasoline. At a stoichiometric air/fuel ratio, this value was approximately 25%. In the rich region ($\lambda=0.85, 0.9, \text{ and } 0.95$), an average 20% reduction in NO emission was obtained using E85.

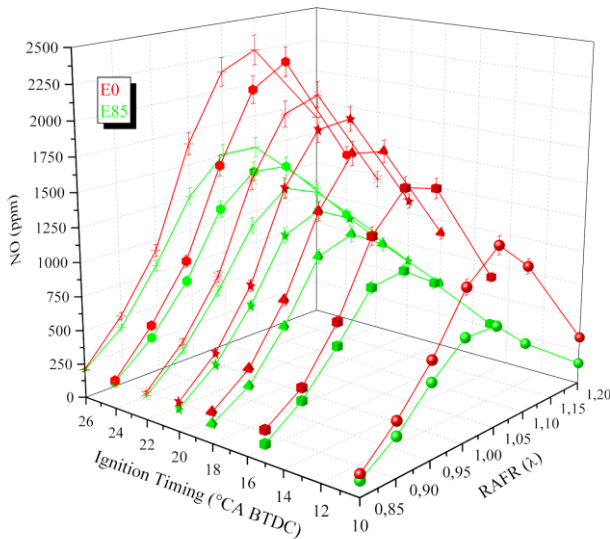


Figure 2. The variation of the NO emission depending on RAFR and ignition timing (Ateşleme zamanı ve HFK'ye bağlı olarak NO emisyonunun değişimi)

The advantages of having lower adiabatic flame temperature and higher heat of vaporization of the possession of ethanol are outstanding specifications in the literature. These specifications support a reduction in NO_x emissions. The study by Nakata et al. [43] showed that an increase in thermal efficiency and a decrease in NO_x were obtained owing to higher combustion speed, lower cooling heat loss, and smaller combustion gas temperature than gasoline. Kumar et al. [44] found that E85 provided about a 30% decrement in NO_x emission compared to E10 during the driving cycle. Park et al. [45] stated that ethanol can reduce engine-out NO_x emissions. Tang et al. [46] studied the effects of ABE (acetone-butanol-ethanol) ratios on engine performance and emissions. Researchers found that increasing the ratio of ABE provided a dramatic reduction in the formation of NO emission because of the lower peak combustion temperature with the charge cooling effect.

In literature, some studies deal with the improvement effect of NO_x emissions with the use of ethanol blends in diesel engines, too. Rakopoulos et al. [47] emphasized that ethanol blends had slightly lower NO_x emissions than neat diesel fuel and higher percentages of ethanol blends promoted further reduction in NO. The study by Morsy [48] stated that ethanol/water mixtures except pure ethanol fumigation decreased NO emission compared to the neat diesel fuel. Şahin et al. [49]

pointed out that lower NO_x emissions could be obtained using ethanol fumigation, and they found that NO_x emissions decreased by approximately 8.5%, 9.79%, and 11.02% for three different fuel delivery rates (1/1, 3/4, and 1/2), respectively.

On the contrary, some studies have reported that NO_x emissions increase. Hasan et al. [50] expressed that methanol and biodiesel mixed with diesel increased the levels of NO_x due to the availability of oxygen in the molecular structure of these fuels. Zhao et al. [51] found that diesel fuel has lower NO_x levels than diesel/alcohol blends. They stated that compared to alcohol blends, diesel had a shorter ignition delay due to the lower heat of vaporization and higher cetane number. Also, it is emphasized in this study that the presence of oxygen in alcohol blends promotes combustion and provides a higher burning speed.

Similar results have been reported in some studies dealing with spark ignition engines. Masum et al. [52] investigated the effects of alcohol blends on the performance and exhaust emissions in a multi-cylinder SI engine. They found that M20, E20, P20, and B20 blends increased NO_x emissions compared to pure gasoline by 20%, 32%, 14.5%, and 11%, respectively. They showed the reason as a possible effect of the high amount of oxygen in the alcohol blends. Zhao et al. [53] found that methanol/gasoline blends caused an increase of 175%-233% in NO_x emissions. They stated that higher flame propagation speed and combustion temperature may have a greater effect on this result.

Hsieh et al. [12] noted that engine operating conditions had a greater effect on NO emissions rather than ethanol content in their study. Briefly, engine operating conditions such as air/fuel ratio, ignition timing, compression ratio, engine speed, inlet air temperature, and EGR rate influence NO_x emissions [16].

Fig. 3 shows the variation of the exhaust gas temperature in both test fuels depending on RAFR and IT. It can be seen in this figure that the exhaust gas temperature decreases for E85 compared to E0. The difference in the exhaust gas temperature of E0 and E85 was approximately an average of 22.6 °C.

It was mentioned in the study by Turner et al. [2] that a decrease in exhaust temperature may result from a reduction in the flame temperature. Moreover, it was expressed that the ethanol content is increased from 0% to 100% in the ethanol/gasoline blend, higher flame speed, better evaporation, and similar or reduced NO_x emissions

were obtained, and the engine efficiency increased compared to baseline gasoline. Renzi et al. [54] reported that exhaust gas temperatures with E50 and E80 are lower than those with gasoline. They even achieved a 100 K reduction in exhaust temperature with the E80 compared to the E00 at 3000 rpm. The researchers suggested that this result is due to the leaner mixture and the higher cooling effect with the evaporation of the alcohol. Masum et al. [55] expressed that E15 caused a 2.2% lower exhaust gas temperature than gasoline because of the lower heating value of ethanol. A similar result was obtained by Agarwal et al. [56].

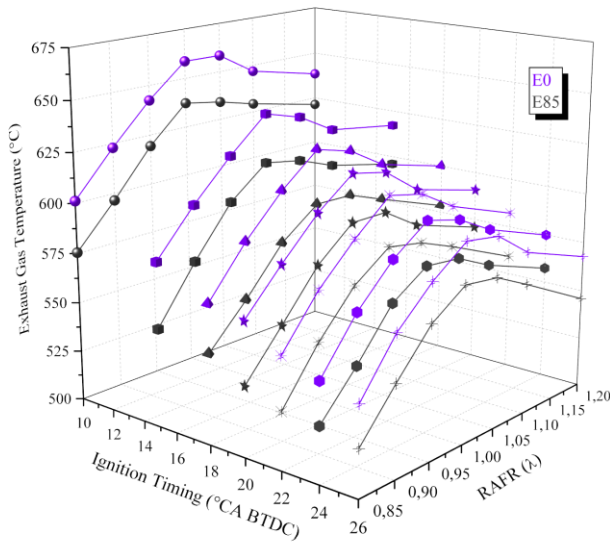


Figure 3. The variation of the exhaust gas temperature depending on RAFR and ignition timing (Ateşleme zamanı ve HFK'ye bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimi)

The variations in various consumption terms and efficiency of both fuels versus IT and RAFR can be seen in Fig. 4 to 7. In these figures, specific values of the RAFR and ignition timing have been chosen as an example to show the change of terms more clearly.

The variation of the brake power, BSFC, and BTE of both fuels versus ignition timing at $\lambda=1$ can be seen in Fig. 4. The ignition timing was changed between 10° and 26° BTDC in the experiments. As seen in Fig. 4, engine power rises when the ignition timing is increased from 10° BTDC to MBT depending on the fuel type and then decreases toward 26° BTDC. Because of the variation in the engine power, higher brake thermal efficiency was obtained using E85, but BSFC increased due to the lower heating value of E85.

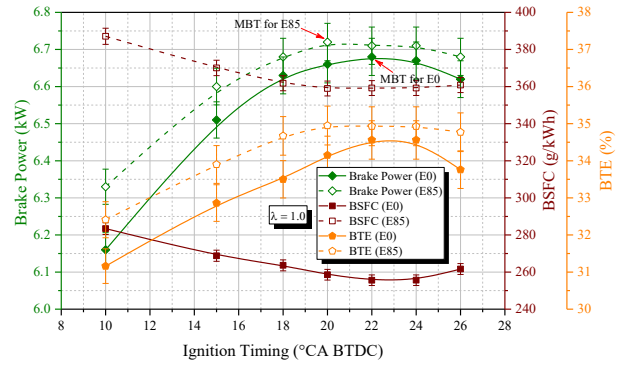


Figure 4. The variation of brake power, BSFC, and BTE of both fuels versus ignition timing (Ateşleme zamanına göre her iki yakıtın motor gücü, FÖYT ve FTV'nin değişimi)

The variation of the brake power and BSFC of both fuels versus RAFR at MBT of each test fuel can be seen in Fig. 5. In the experiments, the RAFR was changed between 0.85 and 1.2. As seen in Fig. 5, the maximum engine power is obtained at 0.9 or 0.95 RAFR due to the higher flame speed. Also, the minimum BSFC was obtained at 1.05 or 1.1 RAFR due to higher brake thermal efficiency.

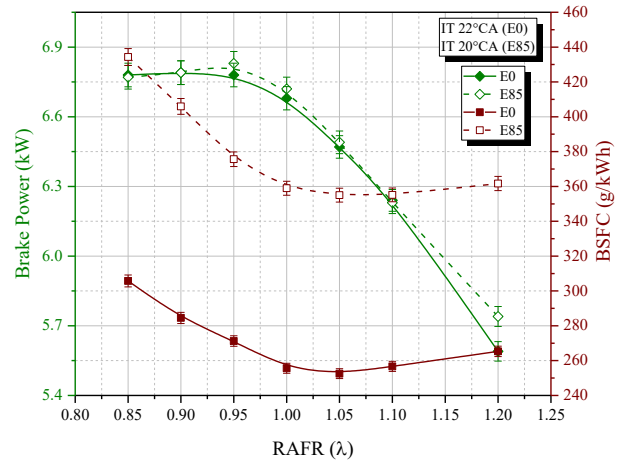


Figure 5. The variation of the brake power and BSFC versus RAFR (HFK'ye göre motor gücü ve FÖYT'nin değişimi)

It can be seen that E85 has higher fuel consumption than E0 as illustrated in Fig. 5. The gravimetric air/fuel ratio of E85 is 9.9 and that of gasoline is 14.7 [1]. If the engine consumes an equal quantity of air in both fuels under the same operating conditions, it means that there is a need for more E85 fuel compared to gasoline. Moreover, the lower heating value of E85 is effective for the fuel quantity of fuel injection per cycle. As stated in the literature [1], the lower heating value of E85 (average 22.65 MJ/L) is approximately 39% less than that of gasoline (average 31.5 MJ/L). Thus, there is a need for higher fuel flow rates for E85 fuel in the fuel delivery system. Erkoca [57] stated that the engine needed more E85 compared to gasoline,

so BSFC increased by 36-45%. In their study, Turner et al. [58] used injectors that provide more fuel flow of 425 cc/min for E85 versus 300 cc/min for gasoline at a pressure of 3 bar. Wicker et al. [59] suggested that the E85 injectors should provide approximately 40% more fuel compared with gasoline stock injectors for the effective controlling of the air/fuel ratio of ECM. Davis and Heil [60] used the new injectors having 50% more static flow rate instead of the OEM in their study, which dealt with modifying a Chevrolet Silverado to convert to operation with E85. Boyle et al. [61] converted a 1999 Chevrolet Silverado to run with E85 fuel. They emphasized that in theory, 39.1% more fuel flow for E85 is necessary compared to gasoline. However, they used injectors with a 2.01 mL/s fuel flow rate instead of 1.65 mL/s using a more efficient burning of ethanol and the modifications of the engine like a higher compression ratio, supercharging, etc. These injectors had 30.7% more flow compared with stock units.

The amount of fuel consumed by weight was obtained similarly to the literature in this study. The fuel mass fuel rate of E85 was on average 39.3% more than compared to that of gasoline. This is because of the lower heating value and air/fuel ratio of ethanol. Also, this situation affected BSFC. BSFC for E85 was obtained on average by 37.5% more compared to that of gasoline.

The energy input into the combustion chamber per second, in other words total heat input, it can be seen in Fig. 6 that the values of the total heat input for E0 and E85 are quite close to each other although the fuel mass flow rate of E85 is more than that of E0. When both fuels were compared with each other, the maximum difference in total heat input obtained was 1.35%.

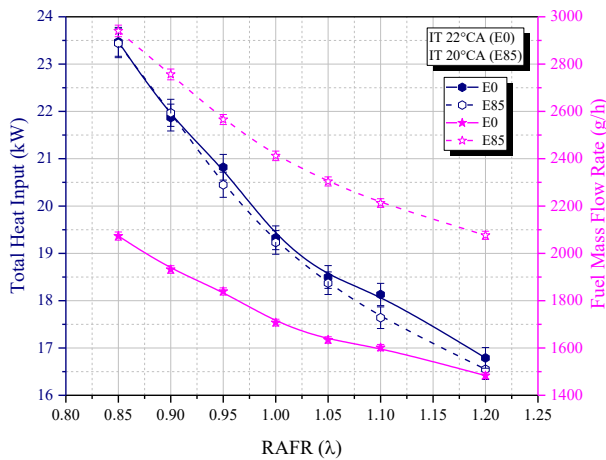


Figure 6. The variation of the total heat input and fuel mass flow rate versus RAFR (HFK'ye göre toplam ısı girişi ve yakıtın kütsel debisinin değışimi)

The advantages of ethanol as an alternative fuel in an SI engine in the thermal efficiency and energy consumption can be seen in Fig. 7. An approximately 3.3% increase in brake thermal efficiency and a 3.2% decrease in BSEC were obtained using E85 considering all experimental data.

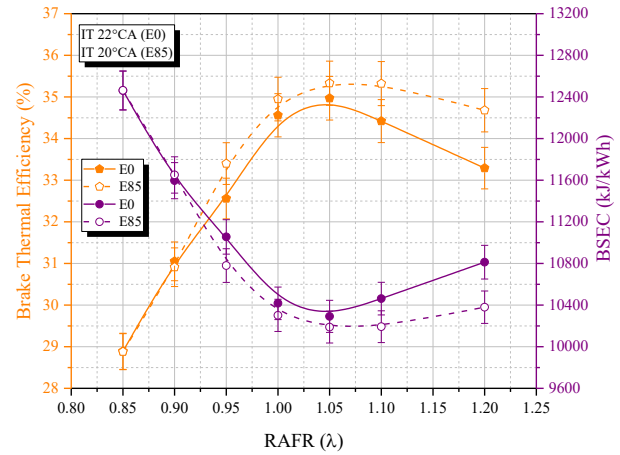


Figure 7. The variation of the brake thermal efficiency and BSEC versus RAFR (HFK'ye göre fren termik verimi ve FÖET'nin değışimi)

In Fig. 2, the emission amount in ppm is used in the comparison of both fuels; however, the specific NO emission can be used to provide more meaning to the obtained emission values. For this purpose, the empirical Eq. (6), which was also used in the studies in the literature [62-65], was used.

$$EP_i = EV_i \times \left(\frac{M_i}{M_{exh}} \times \frac{m\&_{exh}}{P_e} \right) \quad (6)$$

where EP_i , EV_i , M_i , M_{exh} , $m\&_{exh}$, and P_e refer to the pollutant mass (g/kWh), exhaust emission value of the components (ppm), mol mass of the components (kg/kmol), mol mass of the exhaust (kg/kmol), exhaust mass flow (kg/h), and power output (kW), respectively.

Fig. 8 illustrates the variations of BSNO. When Fig. 2 and 8 are compared to each other, it can be seen that the variation of BSNO as g/kWh changes similar to that of NO. When the NO emission emitted from the engine is defined to correspond to how much power the engine produces, it can also be seen that E85 has an advantage. Because of improvement in the NO emission and engine power, BSNO was obtained lesser for E85. Especially when considering 1.05 or 1.1 RAFRs, where NO emission reached the highest value, BSNO decreased by an average of 38.4%.

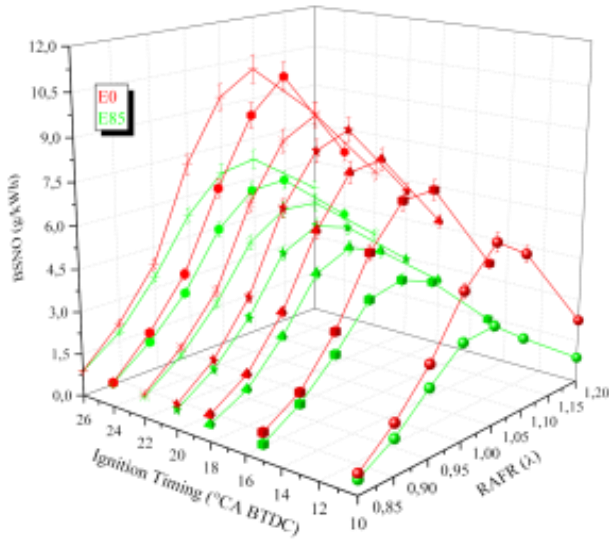


Figure 8. The variation of the BSNO emission depending on RAFR and ignition timing (Ateşleme zamanı ve HFK'ye bağlı olarak özgül NO emisyonunun değişimi)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The results obtained in this study, which compared the effects of E85 and gasoline on NO emissions, considering the ignition timing and RAFR parameters, are summarized as follows:

- The engine output power obtained using E85 was similar to or greater than that of E0.
- When all experimental data obtained with E0 and E85 were compared to each other, it was seen that gravimetric fuel consumption and BSFC were increased on average by 39.3% and 37.5%, respectively. Especially, the lower heating value and stoichiometric air/fuel ratio of ethanol may be considered a reason for this result. However, considering all data each other, brake thermal efficiency increased by an average of 3.3% and BSEC decreased by an average of 3.2% with E85.
- The exhaust gas temperatures for E85 decreased by an average of 22.6 °C, compared to E0. Higher laminar burning velocity and lower adiabatic flame temperature of ethanol could be effective in this result.
- Significant differences were obtained between in values BSNO between gasoline and E85. Considering the maximum NO point of 1.05 or 1.1 RAFRs, a 38.4% reduction in BSNO was obtained.

Conventional vehicles with ICE have been evolving into hybrid, fully electric, or fuel cell vehicles

recently. In this transformation period, the power and energy sources of hybrid vehicles are important for the ecosystem and human beings. In this respect, it can be predicted that studies on the use of alternative fuels such as ethanol for SI engines will continue to be important, especially in hybrid vehicles.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Mustafa Ceyhan ERKOCA: He conducted the experiments, analyzed the results, and performed the writing process.

Deneyleri yaptı, sonuçları analiz etti ve makalenin yazma sürecini gerçekleştirdi.

Tolga TOPGÜL: He carried out the methodology of the study, followed the experiments, analyzed the results, and performed the writing process.

Çalışmanın metodolojisini yürüttü, deneyleri takip etti, sonuçları analiz etti ve makalenin yazma sürecini gerçekleştirdi.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Bechtold RL. (1997). Alternative Fuels Guidebook. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [2] Turner D, Xu H, Cracknell RF, Natarajan V, Chen X. (2011). Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine. Fuel, 90, 1999-2006. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.025>
- [3] Yu X, Guo Z, Sun P, Wang S, Li A, Yang H, Li Z, Liu Z, Li J, Shang Z. (2019). Investigation of combustion and emissions of an SI engine with ethanol port injection and gasoline direct injection under lean burn conditions. Energy,

- 189, 116231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116231>
- [4] Zhang J, Nithyanandan K, Li Y, Lee CF, Huang Z. (2015). Comparative study of high-alcohol-content gasoline blends in an SI engine. SAE Technical Paper, 2015-01-0891. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0891>
- [5] Zhen X, Li X, Wang Y, Liu D, Tian Z. (2020). Comparative study on combustion and emission characteristics of methanol/ hydrogen, ethanol/hydrogen and methane/hydrogen blends in high compression ratio SI engine. Fuel, 267, 117193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117193>
- [6] Awad OI, Mamat R, Ali OM, Sidik NAC, Yusaf T, Kadirgama K, Kettner M. (2018). Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2586-2605. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>
- [7] Mohammed MK, Balla HH, Al-Dulaimi ZMH, Kareem ZS, Al-Zuhairy MS. (2021). Effect of ethanol-gasoline blends on SI engine performance and emissions. Case Studies in Thermal Engineering, 25, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100891>
- [8] Wang C, Zeraati-Rezaei S, Xiang L, Xu H. (2017). Ethanol blends in spark ignition engines: RON, octane-added value, cooling effect, compression ratio, and potential engine efficiency gain. Applied Energy, 191, 603-619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.081>
- [9] Yontar AA. (2020). Impact of ethanol, methyl tert-butyl ether and a gasoline-ethanol blend on the performance characteristics and hydrocarbon emissions of an opposed-piston engine, Biofuels, 11 (2), 141-153. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1661146>
- [10] Yücesu HS, Topgül T, Çinar C, Okur M. (2006). Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. Applied Thermal Engineering, 26, 2272-2278. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.03.006>
- [11] Al-Hasan M. (2003). Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. Energy Conversion and Management, 44 (9), 1547-1561. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00166-8)
- [12] Hsieh WD, Chen RH, Wu TL, Lin TH. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. Atmospheric Environment, 36, 403-410. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00508-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00508-8)
- [13] Hussain SKA, Usman M, Umer J, Farooq M, Noor F, Anjum R. (2022). A novel analysis of n-butanol-gasoline blends impact on spark ignition engine characteristics and lubricant oil degradation. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2036874>
- [14] Jia LW, Shen MQ, Wang J, Lin MQ. (2005). Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine. Journal of Hazardous Materials, 123 (1-3), 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.046>
- [15] Rajendran S, Govindasamy M. (2022). Effect of isopropyl alcohol on the performance, combustion and emission characteristics variable compression ratio engine using rubber seed oil blends. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1887408>
- [16] Shirazi SA, Abdollahipoor B, Windom B, Reardon KF, Foust TD. (2020). Effects of blending C3-C4 alcohols on motor gasoline properties and performance of spark ignition engines: A review. Fuel Processing Technology, 197, 106194. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106194>
- [17] Topgül T. (2015). The effects of MTBE blends on engine performance and exhaust emissions in a spark ignition engine. Fuel Processing Technology, 138, 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.06.024>
- [18] Topgül T, Cinar C, Ozdemir AO. (2021). The variations of the exhaust emissions at low ambient temperature for E10 and M10 fueled SI engine. Journal of Thermal Science and Technology, 41 (2), 227-237. <https://doi.org/10.47480/isibted.1025931>
- [19] Singh PK, Ramadhas AS, Mathai R, Sehgal AK. (2016). Investigation on combustion, performance and emissions of automotive engine fueled with ethanol blended gasoline. SAE Int. J. Fuels Lubr., 9 (1), 215-223. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0886>
- [20] Hasan AO, Al-Rawashdeh H, Al-Muhtaseb AH, Abu-jrai A, Ahmad R, Zeaiter J. (2018). Impact of changing combustion chamber geometry on emissions, and combustion characteristics of a single cylinder SI (spark ignition) engine fueled with ethanol/gasoline

- blends. *Fuel*, 231, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.045>
- [21] Farrell JT, Johnston RJ, Androulakis IP. (2004). Molecular structure effects on laminar burning velocities at elevated temperature and pressure. SAE Technical Paper, 2004-01-2936. <https://doi.org/10.4271/2004-01-2936>
- [22] Tian G, Daniel R, Li H, Xu H, Shuai S, Richards P. (2010). Laminar burning velocities of 2,5-dimethylfuran compared with ethanol and gasoline. *Energy&Fuels*, 24, 3898–3905. <https://doi.org/10.1021/ef100452c>
- [23] Topgül T, Yücesu HS. (2006). Etanol benzin karışımı kullanılan bir motorda sıkıştırma oranı ve ateşleme zamanının motor momentane etkisi. 3. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Muğla, 542-553.
- [24] Kalghatgi G, Algunaibet I, Morganti K. (2017). On knock intensity and superknock in SI engines. *SAE Int. J. Engines*, 10 (3), 1051-1063. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0689>
- [25] Sasaki N, Nakata K. (2012). Effect of fuel components on engine abnormal combustion. SAE Technical Paper, 2012-01-1276. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1276>
- [26] How HG, Masjuki HH, Kalam MA, Teoh YH. (2014). An investigation of the engine performance, emissions and combustion characteristics of coconut biodiesel in a high-pressure common-rail diesel engine. *Energy*, 69, 749-759. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.070>
- [27] Kakoe A, Bakhshan Y, Aval SM, Ghareghani A. (2018). An improvement of a lean burning condition of natural gas/diesel RCCI engine with a pre-chamber by using hydrogen. *Energy Conversion and Management*, 166, 489-499. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.063>
- [28] Akcay M, Yilmaz IT, Feyzioglu A. (2021). The influence of hydrogen addition on the combustion characteristics of a common-rail CI engine fueled with waste cooking oil biodiesel/diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 223, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106999>
- [29] Gong C, Li Z, Yi L, Huang K, Liu F. (2020). Research on the performance of a hydrogen/methanol dual-injection assisted spark-ignition engine using late-injection strategy for methanol. *Fuel*, 260, 116403. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116403>
- [30] Huang Y, He X, Zhang H, Wei J, Sng DWM. (2021). Spark ignition and stability limits of spray kerosene flames under subatmospheric pressure conditions. *Aerospace Science and Technology*, 114, 106734. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106734>
- [31] İlhak Mİ, Doğan R, Akansu SO, Kahraman N. (2020). Experimental study on an SI engine fueled by gasoline, ethanol and acetylene at partial loads. *Fuel*, 261, 116148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116148>
- [32] Holman JP. (1989). *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill, Inc.
- [33] Nour M, Kosaka H, Bady M, Sato S, Abdel-Rahman AK. (2017). Combustion and emission characteristics of DI diesel engine fuelled by ethanol injected into the exhaust manifold. *Fuel Processing Technology*, 164, 33-50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.04.018>
- [34] Rocha DD, Radicchi FC, Lopes GS, Brunocilla MF, Gomes PCF, Santos NDSA, Malaquias ACT, Filho FAR, Baêta JGC. (2021). Study of the water injection control parameters on combustion performance of a spark-ignition engine. *Energy*, 217, 119346. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119346>
- [35] Heywood JB. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- [36] Hochgreb S. (1998). Combustion-related emissions in SI engines. In: *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines Pollutant Formation and Control*, ed. E. Sher, Boston: Academic Press, 118-170.
- [37] Abdel-Rahman AA. (1998). On the emissions from internal-combustion engines: A review. *International Journal of Energy Research*, 22, 483-513. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199805\)22:6<483::AID-ER377>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199805)22:6<483::AID-ER377>3.0.CO;2-Z)
- [38] Schäfer F, Basshuysen RV. (1995). *Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automotive Engines*. Wien: Springer-Verlag.
- [39] Mondt JR. (2000). *Cleaner cars: The History and Technology of Emission Control since the 1960s*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [40] Alasfour FN. (1998). NO_x emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: Part 1-Preheating inlet air. *Applied Thermal Engineering*, 18, 245-256. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00081-1)
- [41] Lavoie GA, Heywood JB, Keck JC. (1970). Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines. *Combust. Sci. Technol.*, 1, 313-326.

- [42] Alasfour FN. (1998). NO_x emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: Part 2-Ignition timing. *Applied Thermal Engineering*, 18 (8), 609-618. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00082-3)
- [43] Nakata K, Utsumi S, Ota A, Kawatake K, Kawai T, Tsunooka T. (2006). The effect of ethanol fuel on a spark ignition engine. *SAE Technical Paper*, 2006-01-3380. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3380>
- [44] Kumar S, Ramadhas AS, Kumar P, Sithanathan M, Maheshwari M, Kagdiyal V. (2021). Fuel economy and emissions of E85 in passenger cars - A move towards flex fuel vehicle. *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility*, 3 (3), 1337-1343. <https://doi.org/10.4271/2021-28-0009>
- [45] Park C, Choi Y, Kim C, Oh S, Lim G, Moriyoshi Y. (2010). Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas. *Fuel*, 89, 2118-2125. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.018>
- [46] Tang Q, Duan X, Liu Y, Li S, Zhao Z, Ren K, Li Y, Chang H. (2020). Experimental study the effects of acetone-butanol-ethanol (ABE), spark timing and lambda on the performance and emissions characteristics of a high-speed SI engine. *Fuel*, 279, 118499. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118499>
- [47] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC. (2007). Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blend. *Energy*, 32, 1791-1808. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.03.005>
- [48] Morsy MH. (2015). Assessment of a direct injection diesel engine fumigated with ethanol/water mixtures. *Energy Conversion and Management*, 94, 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.086>
- [49] Şahin Z, Durgun O, Kurt M. (2015). Experimental investigation of improving diesel combustion and engine performance by ethanol fumigation-heat release and flammability analysis. *Energy Conversion and Management*, 89, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.053>
- [50] Hasan AO, Osman AI, Al-Muhtaseb AH, Al-Rawashdeh H, Abu-jrai A, Ahmad R, Gomaa MR, Deka TJ, Rooney DW. (2021). An experimental study of engine characteristics and tailpipe emissions from modern DI diesel engine fuelled with methanol/diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 220, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106901>
- [51] Zhao W, Yan J, Gao S, Lee TH, Li X. (2022). The combustion and emission characteristics of a common-rail diesel engine fueled with diesel, propanol, and pentanol blends under low intake pressures. *Fuel*, 307, 121692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121692>
- [52] Masum BM, Kalam MA, Masjuki HH, Palash SM, Fattah IMR. (2014). Performance and emission analysis of a multi cylinder gasoline engine operating at different alcohol-gasoline blends. *RSC Advances*, 4, 27898-27904. <https://doi.org/10.1039/C4RA04580G>
- [53] Zhao H, Ge Y, Hao C, Han X, Fu M, Yu L, Shah AN. (2010). Carbonyl compound emissions from passenger cars fueled with methanol/gasoline blends. *Science of the Total Environment*, 408, 3607-3613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.046>
- [54] Renzi M, Bietresato M, Mazzetto F. (2016). An experimental evaluation of the performance of a SI internal combustion engine for agricultural purposes fuelled with different bioethanol blends. *Energy*, 115, 1069-1080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.050>
- [55] Masum BM, Masjuki HH, Kalam MA, Palash SM, Habibullah M. (2015). Effect of alcohol-gasoline blends optimization on fuel properties, performance and emissions of a SI engine. *Journal of Cleaner Production*, 86, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.032>
- [56] Agarwal AK, Karare H, Dhar A. (2014). Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol-gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine. *Fuel Processing Technology*, 121, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.12.014>
- [57] Erkoca MC. (2010). Alternatif Yakıt Olarak Etanol Kullanılan Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Vuruntu Sınırının Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [58] Turner JWG, Pearson RJ, Holland B, Peck R. (2007). Alcohol-based fuels in high performance engines. *SAE Technical Paper*, 2007-01-0056. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0056>
- [59] Wicker RB, Hutchison PA, Acosta OA, Matthews RD. (1999). Practical Considerations for an E85-fueled vehicle conversion. *SAE*

- Technical Paper, 1999-01-3517.
<https://doi.org/10.4271/1999-01-3517>
- [60] Davis GW, Heil ET. (2000). The development and performance of a high blend ethanol fueled vehicle. SAE Technical Paper, 2000-01-1602. <https://doi.org/10.4271/2000-01-1602>
- [61] Boyle J, Chamberlain B, Henrich C, Howe T, Johnson J, Jones B, Martinez E, Mathison S, Ready K, Straumann D, Winkelman J. (2000). E85 1999 Chevrolet Silverado: A conversion by Minnesota State University, Mankato for the “1999 ethanol vehicle challenge”. SAE Technical Paper, 2000-01-0591. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0591>
- [62] Ağbulut Ü, Sarıdemir S, Albayrak S. (2019). Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41, 389. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1891-8>
- [63] Guillin-Estrada W, Maestre-Cambronel D, Bula-Silvera A, Gonzalez-Quiroga A, Duarte-Forero J. (2021). Combustion and performance evaluation of a spark ignition engine operating with acetone–butanol–ethanol and hydroxyl. Applied Sciences, 11, 5282. <https://doi.org/10.3390/app11115282>
- [64] Karagöz Y, Balcı Ö, Köten H. (2019). Investigation of hydrogen usage on combustion characteristics and emissions of a spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 14243-14256. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.147>
- [65] Pilusa TJ, Mollagee MM, Muzenda E. (2012). Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter, Aerosol and Air Quality Research, 12, 994–1006. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0100>