

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2023, Volume: 11 Issue: 2

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Musa YILDIZ – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Cevriye GENCER – 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. Serap SAFRAN – Ankara Üniversitesi Doç. Dr. Nihat DALDAL – Bolu İzzet Baysal Üniversitesi Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Naki GULER – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Fecir DURAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Abdullah Cemil İLÇE – Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Doç. Dr. Tuğba TABANLIGİL CALAM – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Alpay ÖZER – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Tuğba SARAÇ – Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Doç. Dr. Orhan KAPLAN – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Cevdet Emin EKİNCİ – Fırat Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Ömer ASLAN – Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Kubulay ÇAĞATAY – Nuh Naci Yazgan Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi

HAKKINDA

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

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

ABOUT

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

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

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

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

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

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

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

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

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




İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Investigation of the Effect of Tempering and Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Boron Steels** (Araştırma Makalesi), Gözde ALTUNTAŞ, Ömer Faruk KAPLAN, Bülent BOSTAN 300
2. **17-4 PH Paslanmaz Çeliğin MoS₂ Nanoakışkan Koşulları Altında Sürtünme/Aşınma Performansının İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Emine ŞİRİN 309
3. **A new Intrusion Detection System for Secured IoT/IIoT Networks based on LGBM** (Araştırma Makalesi), İlhan Fırat KILINÇER, Oğuzhan KATAR 321
4. **High Performance and Cycling Stability Supercapacitors Employing MnS@Polypyrrole Nanocomposites as Cathode Material** (Araştırma Makalesi), Mahir GÜLEN 329
5. **The effect of reinforcement ratio on corrosion properties of Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composites produced by hot pressing** (Araştırma Makalesi), Hasan KARABULUT, Kubilay KARACİF 339
6. **Türkiye’de Yapılan Siber Güvenlik Faaliyetlerinin ve Eğitim Çalışmalarının Değerlendirilmesi** (Derleme Makalesi), Hüseyin ÇAKIRI, Murat TAŞER 347
7. **İstatistiksel Kalite Kontrol Metotlarının Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması** (Araştırma Makalesi), Ömer Faruk YILMAZ 367
8. **Cantor Yüksek Entropili Alaşımına Mn Yerine Cu İkamesinin Yapısal ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Kürşat İÇİN, Sefa Emre SÜNBÜL, Ataberk YILDIZ 379
9. **Bir Mobilya İşletmesinde Ar-Ge Birimi Süreç Analizi** (Araştırma Makalesi), Burak KILICI, Kemal YILDIRIM, Kadir Cem TUĞCU 388
10. **A Wide Frequency Range C-V and G-V Characteristics Study in Schottky Contacts with a BODIPY-Pyridine Organic Interface** (Araştırma Makalesi), Enis TAŞCI 398
11. **Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi** (Araştırma Makalesi), Aslıhan BAYYİĞİT, Oğuz Kaan ÇİNİCİ, Adem ACIR 407
12. **The Effect of High Pressure Die-Casting Machine’s Parameters on the Mechanical Properties of the Aluminium Alloy Material** (Araştırma Makalesi), Emre AKKAYA, Yunus KAYIR 421
13. **Investigation of the Effect of Filling Ratio on Mechanical Properties of Pumice Filled Epoxy-Based Composites** (Araştırma Makalesi), Ertan KÖSEDAĞ 431
14. **Türkiye'deki Hava Trafik Kontrolörlerinin Çizelgelenmesi: Hedef Programlama Kullanarak İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı** (Araştırma Makalesi), Zekeriya KAPLAN, Büşra TUTUMLU, İlknur TÜKENMEZ 439

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

15. **Nozul Soğutma Sisteminde Verimliliğin Arttırılmasına Yönelik Bir Araştırma** (Araştırma Makalesi), Mustafa AKTAŞ, Zafer DENİZ, Yaren GÜVEN, Veysel DURAK, Merve ULULAR, Deniz GÖKBEN 455
16. **The Implementation of Internal Mode Control Method to SEPIC Converter for Battery Charging Systems** (Araştırma Makalesi), Fatih Süleyman TAŞKINCAN, Ahmet KARAARSLAN, Zafer ORTATEPE 464
17. **Fleet Type Planning for Private Airline Transportation After Covid-19** (Araştırma Makalesi), Raziye KILIÇ, Özge ALBAYRAK ÜNAL, Burak ERKAYMAN 475
18. **Agrega Gradasyonunun Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Deniz ARSLAN, Hüseyin KÖSE 486
19. **Performance Evaluation of Brushless Direct Current Motor Control Methods through Low-Cost Microcontroller-Based Real-Time Experiments** (Araştırma Makalesi), Emre YORAT, Necdet Sinan ÖZBEK, Lütfü SARIBULUT 498
20. **Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper Tasarımı ve Geometrik Optimizasyonu** (Araştırma Makalesi), Hakan DOĞAN, İsmail ŞAHİN, Zekeriya PARLAK 511
21. **PV Modüller/Hücrelerin Tek-Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Kestirimi İçin Yeni Bir Analitik Model** (Araştırma Makalesi), Ulaş EMİNOĞLU, Bilge Kaan ATAY 524
22. **Investigation of a Beta Spectrum through Virtual MCA Supported By Virtual Oscilloscope** (Araştırma Makalesi), Gözde TEKTAŞ, Cüneyt ÇELİKTAŞ 534
23. **Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Vermicular Graphite Cast Iron by Using Thermal Analysis** (Araştırma Makalesi), Merve Ulular, Veysel Durak, Cem Uluç, Hasan Hasırcı 542
24. **TCGA Verilerinden H&E ile Boyanmış Örneklerden Mesane Kanseri Derecelendirmesi** (Araştırma Makalesi), Ali DEĞİRMENCİ, İlyas ÇANKAYA, Berrak GÜMÜŞKAYA ÖCAL, Ömer KARAL 549
25. **The Effect of Vertical Skylights Designed in Buildings on Daylight Illumination** (Araştırma Makalesi), Yaren Dilara ERDEM, Şule YILMAZ ERTEN, Filiz UMAROĞULLARI 561

Investigation of the Effect of Tempering and Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Boron Steels

Gözde ALTUNTAŞ^{1,*}  Ömer Faruk KAPLAN²  Bülent BOSTAN¹ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara Turkey

²Gazi University, Institute of Science and Technology, 06560 Ankara, Turkey

Article Info:

Research article
Received: 27/03/2023
Revision: 06/04/2023
Accepted: 13/04/2023

Keywords

Boron steels,
Cryogenic treatment,
Tempering

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/03/2023
Düzeltilme: 06/04/2023
Kabul: 13/04/2023

Anahtar Kelimeler

Borlu çelikler
Kriyojenik işlem
Temperleme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, boron steels are shaped by forging process and the differences created by cryogenic and tempering processes in the structure are mentioned))

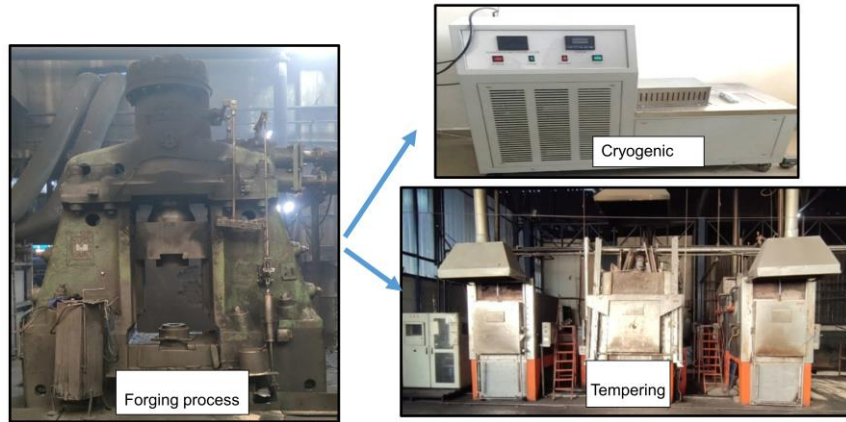


Figure A: Forming and heat treatment processes /Şekil A: Dövme ve ısıtım süreçleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Heat treatment of boron steels
- Shallow cryogenic temperature
- Improvement of mechanical properties

Aim (Amaç): The aim of this study is to shape boron steels by forging method and to investigate the effect of cryogenic and tempering processes. / Bu çalışmanın amacı, borlu çelikleri dövme yöntemi ile şekil vermek ve kriyojenik ve temperleme işlemlerinin etkisini araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): In this study, a new heat treatment route was created for boron steel produced by forging method by using temper and cryogenic treatment together. / Bu çalışmada, temperleme ve kriyojenik işlemin bir arada kullanılarak dövme yöntemiyle üretilen bor çeliği için yeni bir ısıtım rotası oluşturulmuştur.

Results (Bulgular): With this article, it was found to be mechanically better when tempering and cryogenic treatment were used together. Wear resistance is improved by tempering and cryogenic treatment. / Bu makale ile temperleme ve kriyojenik işlemin birlikte kullanılmasının mekanik olarak daha iyi olduğu görülmüştür. Aşınma direnci temperleme ve kriyojenik işlemlerle iyileştirilir.

Conclusion (Sonuç): It was determined that the abrasion resistance of the tempered and cryogenically treated 33B+TK samples increased by approximately 55% compared to the raw material. / Temperlenmiş ve kriyojenik işlem görmüş 33B+TK numunelerinin aşınma direncinin ham maddeye göre yaklaşık %55 arttığı belirlenmiştir.



Investigation of the Effect of Tempering and Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Boron Steels

Gözde ALTUNTAŞ^{1,*} Ömer Faruk KAPLAN² Bülent BOSTAN¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara Turkey

²Gazi University, Institute of Science and Technology, 06560 Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 27/03/2023

Revision: 06/04/2023

Accepted: 13/04/2023

Keywords

Boron steels,
Cryogenic treatment,
Tempering

Abstract

Boron steels are a group of steels that stand out with their high wear resistance and hardenability. In this study, 33MnCrB5-2 boron steel was shaped by applying hot forging process. After the hot forging process, the microstructure examinations and mechanical tests of the materials were carried out. A group of materials was shallow cryogenically treated at -80 °C for 2 hours. Then, a different group of materials was austenitized at 890 °C and quenched, and then tempered at 400 °C for 90 minutes. In the last group of materials, after tempering heat treatment, cryogenic treatment was applied at -80 °C for 2 hours. Hardness and abrasion tests were carried out on the samples that were subjected to cryogenic treatment and tempering heat treatment. Microstructure analyzes were examined with scanning electron microscope (SEM) and optical microscope. Element distributions from different regions in the microstructure were analyzed with energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS). The crystallite size of the materials was calculated by X-ray diffraction. The results showed that the wear resistance of cryogenic treat samples after tempering improved by 55% compared to the raw sample. The hardness value was measured as 613 HV1 by cryogenic treatment after tempering.

Borlu Çeliklere Uygulanan Temperleme ve Kriyojenik İşlemin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/03/2023

Düzeltilme: 06/04/2023

Kabul: 13/04/2023

Anahtar Kelimeler

Borlu çelikler
Kriyojenik işlem
Temperleme

Öz

Borlu çelikler, aşınma direnci yüksek ve sertleşebilme kabiliyeti ile ön plana çıkmış bir çelik grubudur. Bu çalışma da 33MnCrB5-2 borlu çeliğe sıcak dövme işlemi uygulanarak şekillendirilmiştir. Sıcak dövme işlemi sonrası malzemelerin mikroyapı incelemeleri ve mekanik testleri yapılmıştır. Bir grup malzemeye -80 °C de 2 saat kriyojenik işlem uygulanmıştır. Ardından farklı bir grup malzeme 890 °C östenitlenip su verilmiş ardından 400 °C'de 90 dakika temperleme işlemi uygulanmıştır. Son grup malzeme de temperleme ısıl işlemi sonrası -80 °C de 2 saat kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem ve temperleme ısıl işlemi uygulanan numunelerin mekanik olarak sertlik ve aşınma testi yapılmıştır. Mikroyapı analizleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop yardımı ile incelenmiştir. Enerji-dağıtıcı X-ışını spektrometresi (EDS) ile ısıl işlemler sonrası mikroyapıdaki farklı bölgelerden element dağılımları analiz edilmiştir. X-ışını difraksiyonu ile malzemelerin tane boyutları hesaplanmıştır. Sonuçlar temperleme sonrası kriyojenik işlem uygulanan numunelerin sertlik değerinin ve aşınma dayanımının diğer numunelere kıyasla daha yüksek değerler verdiğini göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Boron micro alloy steels offer better hardenability at a lower cost. Trace amounts of boron allow the production of high-strength parts with a uniform martensite microstructure [1]. It prevents the formation of micro-structures such as boron, ferritin, and perlite, which are separated at the

austenite grain boundaries. It has been reported that the positive effect of boron on hardenability is due to the separation of boron atoms at the austenite grain boundaries. [2-6]. The formation of these precipitates consumes boron atoms that dissociate at the austenite grain boundaries and the boron addition loses its beneficial effect on hardenability

[7,8]. Boron steels form a group of special steels and although they offer good hardenability, the boron content should be limited as contents higher than 30 ppm impair toughness [9-11]. The most common applications of boron steels require a tempered martensitic microstructure because of the better properties tempered martensite provides [12,13]. Therefore, annealed boron steel is suitable for applications in manufacturing automotive structural parts and allows the production of lighter components in vehicles that contribute to weight reduction [14]. Currently, the most important requirement in the automotive industry is to design vehicles with reduced weight and high safety to meet the needs for a wide range of products. The critical goals for a vehicle designer are cost savings and reduction of gas emissions. For this purpose, the cross-sectional areas of the vehicle parts have been reduced and thinner parts made of high-strength steel have been used. Among these steels, the most popular are dual-phase steels, transformation TRIP steels, boron steels, martensitic steels and more recently developed (TWIP) steels [15-17]. Boron manganese hot rolled alloy steels, also called boron steels or MnB steels, are popular due to their excellent mechanical properties [18]. During the cryogenic treatment, the retained austenite phase transforms into a hard martensite phase resulting in an improvement in both wear resistance and dimensional accuracy [19]. It has been stated in different studies that the cryogenic process can be performed in two ways. It is divided into shallow and deep cryogenic treatment. Shallow cryo-processing is performed between -100 and -40°C, while deep cryo-processing is performed below -100°C. It is thus done to achieve the common goal of an improvement in wear resistance by reducing retained austenite and strengthening atomic bonds. It has also been reported that tempering after cryogenic treatment can provide greater wear resistance due to the formation of fine carbides on the tempered martensite matrix [20,21].

As summarized above, numerous studies have been conducted on the tempering conditions of 33MnCrB5-2 boron steel. However, the researchers

did not perform experimental studies combining the cryogenic treatment and tempering parameters. Considering the microstructural evolution according to these heat treatments, they did not reveal the wear behavior of these steels. For the first time, the effects of shallow cryogenic, tempering, tempering + shallow cryogenically treated 33MnCrB5-2 boron steel were investigated in detail.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The chemical composition of the commercially available 33MnCrB5-2 material used in experimental studies is given in Table 1. This material is shaped by forging, which is a plastic forming process. The samples were first cut with a diameter of 55mm and a length of 250mm and used in a 60mm diameter coil in a 600 kW induction device, and heating with inductance was applied. After the heating process, the forging process was carried out at 1150 °C with the help of a 6300 ton air hammer. The forging process temperature was controlled with a laser thermometer. After the thickness of the materials was reduced to 12 mm, the materials were left to cool. This material is coded as 33B. In order to remove scales on the surfaces of the forged steels, 30 minutes of sandblasting was applied with steel granules, which are S390 material. In order to see the invisible cracks and damages on the surface of the materials during the forging process, the inspection process was carried out with a TMM brand MP 800-2AC model crack control device. Forged materials are cut by wire erosion method according to ASTM G-99 standard. After the cutting process, a group of materials was cryogenically treated at -80 °C for 2 hours. These materials are coded as 33B+K. Other group materials were austenitized at 890 °C and quenched after forging, and then tempered at 400 °C for 90 minutes. These materials are coded as 33B+T. After tempering, some materials were cryogenically treated at -80 °C for 2 hours and coded as 33B+TK.

Table 1. Chemical composition of materials (*Malzemelerin kimyasal bileşimi*)

Chemical Composition (%)								
C	Mn	Si	Cr	Al	P	S	B	Fe
0.32	1.45	0.19	0.47	0.032	0.007	0.004	0.0033	Balance

Microstructures of the samples, which were subjected to classical metallographic processing for microstructure analysis, were examined with JEOL JSM-6060LV Scanning Electron Microscope (SEM) and Leica DMI5000 model optical microscope. Hardness tests were measured with Qness brand macro hardness tester. The diffraction planes of the samples and the distribution of carbides were determined with the Bruker brand XRD device. At the same time, crystallite size calculations were made with XRD analysis. UTS brand abrasion tester was used to determine weight losses at 1000 m distance under 25N load.

3.RESULTS (BULGULAR)

In Figure 1, optical microstructure images of the samples are given. It belongs to the 33MnCrB5-2 material after forging, which we encoded as 33B in Figure 1 (a). This structure consists of ferrite and perlite. Figure 1 (b) shows the 33B+K specimen, which was cryogenically treated at -80 °C after forging. Its microstructure consists of ferrite and perlite. However, with the effect of the cryogenic

process, it is seen that the ferrite networks at the grain boundaries become coarser and cause an increase in grain size. Here, the ferrite and pearlite bands are probably due to the segregation of the alloy during initial solidification, when alloying elements are ejected into interdendritic regions and then become prominent after hot forging [22]. Pre-eutectoid ferrite appears as a fine, continuous network in previous austenite grains, and the volume fraction of ferrite increases with increasing cooling rate. These effects are generally related to the effect of the cooling rate on the ferrites coalescence and growth rates [23]. The increase in cooling rates lowers the transformation temperature, and the lower temperature perlite form results in finer pearlite grains. In Figure 1 (c), the tempered sample, which we coded as 33B+T, can be seen. The dominant microstructure here is tempered martensite. The microstructure obtained when the samples are continuously cooled in water is martensite, which is not a desirable phase because of its detrimental effect on toughness [24]. For this reason, tempering heat treatment was applied to these materials after quenching.

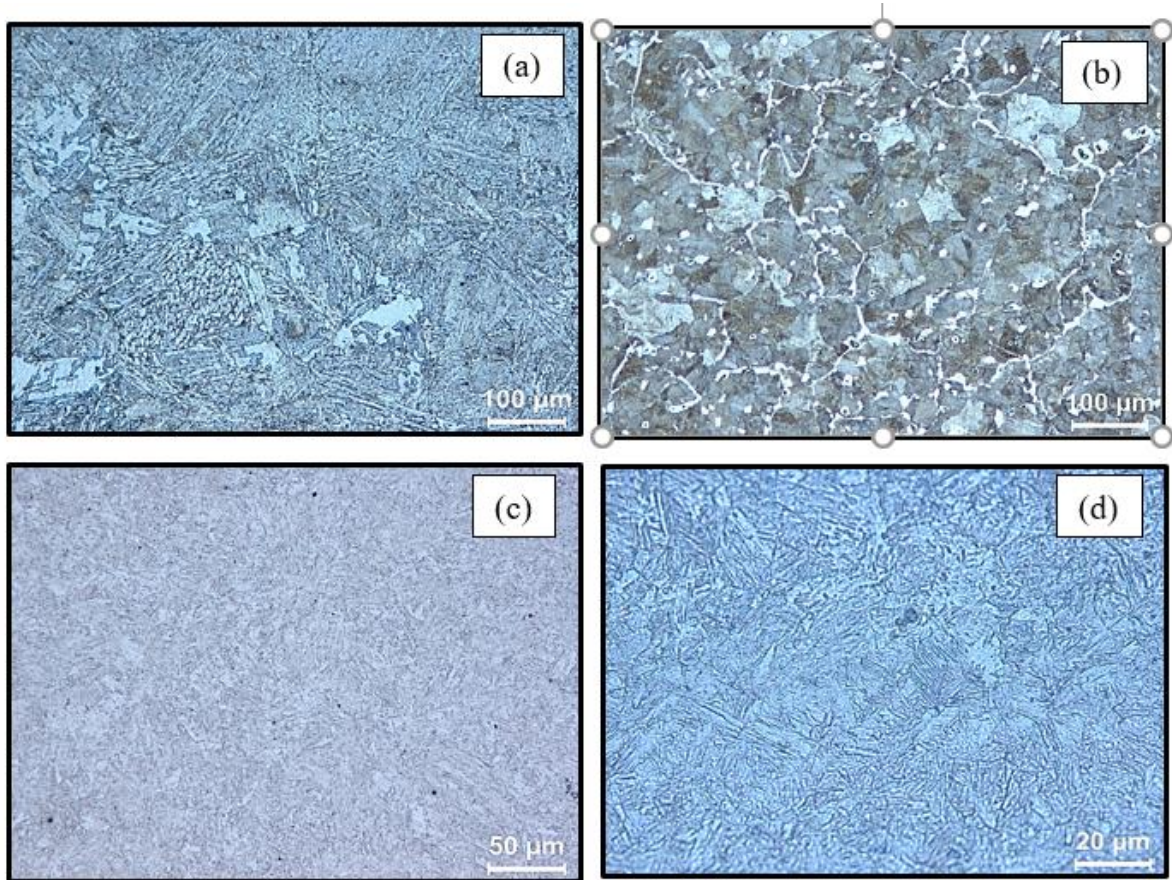


Figure 1. Optical microscope images of the samples (a) 33B (b) 33B+K (c) 33+T (d) 33B+TK
(Numunelerin optic mikroskop görüntüleri)

Figure 2 shows the SEM microstructures of the samples. Compared to an optical microscope, the phases are seen more distinctly as it can be viewed at large magnifications. Samples 33B and 33B+K are shown in Figure 2 (a-b). It is seen that the cryogenic process opens the gap between the perlite lamellae. In other words, it caused the formation of a coarser perlite structure. Also, the grain size increased. It was seen in Figure 4 that there was a decrease in hardness in the samples that underwent cryogenic treatment after forging. This supports why the hardness decreases with the hall patch effect [25]. It has been observed that the pre-eutectoid ferrite networks expand by cryogenic treatment and there are separations in the ferrite

networks in some regions. Figure 2 (c-d) 33B+T and 33B+TK samples are shown. It has been observed that carbides are frequently formed in a spherical form (yellow areas) by cryogenic treatment after tempering. As it is known, the structure tends to decrease its free energy. Since the process is done below 0 °C with the cryogenic process, the entropy decreases with the disorder. Since the disorder is reduced, it is thought that carbides are formed in a spherical form in order to provide the internal balance of the structure and decrease the free energy thermodynamically [26].

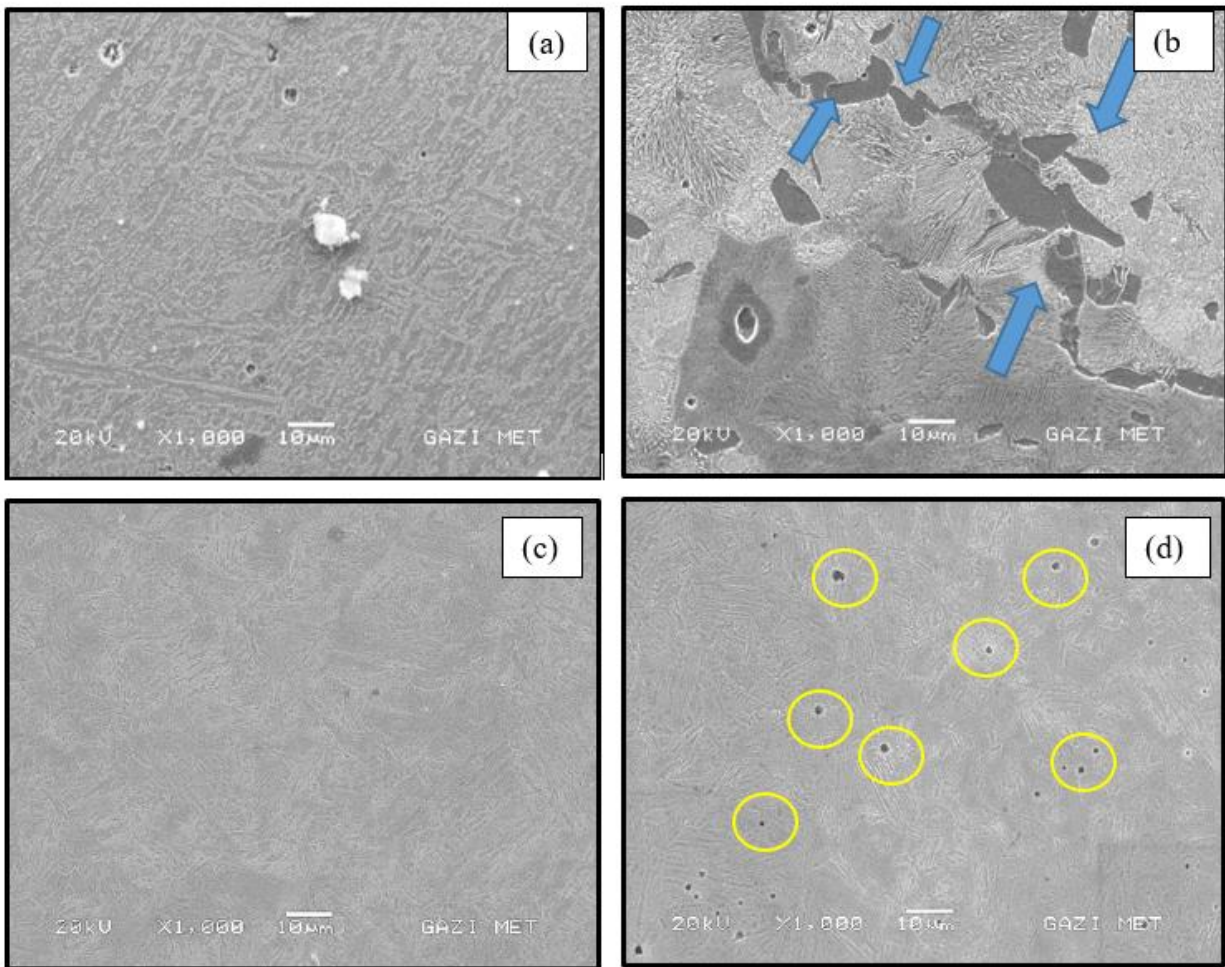


Figure 2. SEM microstructure images of the samples (a) 33B (b) 33B+K (c) 33+T (d) 33B+TK (*Numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri*)

Figure 3 shows the EDS analyzes taken over the SEM microstructures. It was observed that the Cr element was higher at the 1st point in the microstructure of the 33Mn+K sample in Figure 3 (a). Cr is in the group of ferrite-forming elements. Since these regions are known as ferrite networks, the Cr element is therefore thought to be in higher

proportion. Figure 3 (b) shows the spherical carbides formed in the 33Mn+TK sample. In the EDS analyzes in these regions, 15% B and 3% C elements were detected. Clustering of Boron element by cryogenic treatment is seen both in EDS analysis and microstructures.

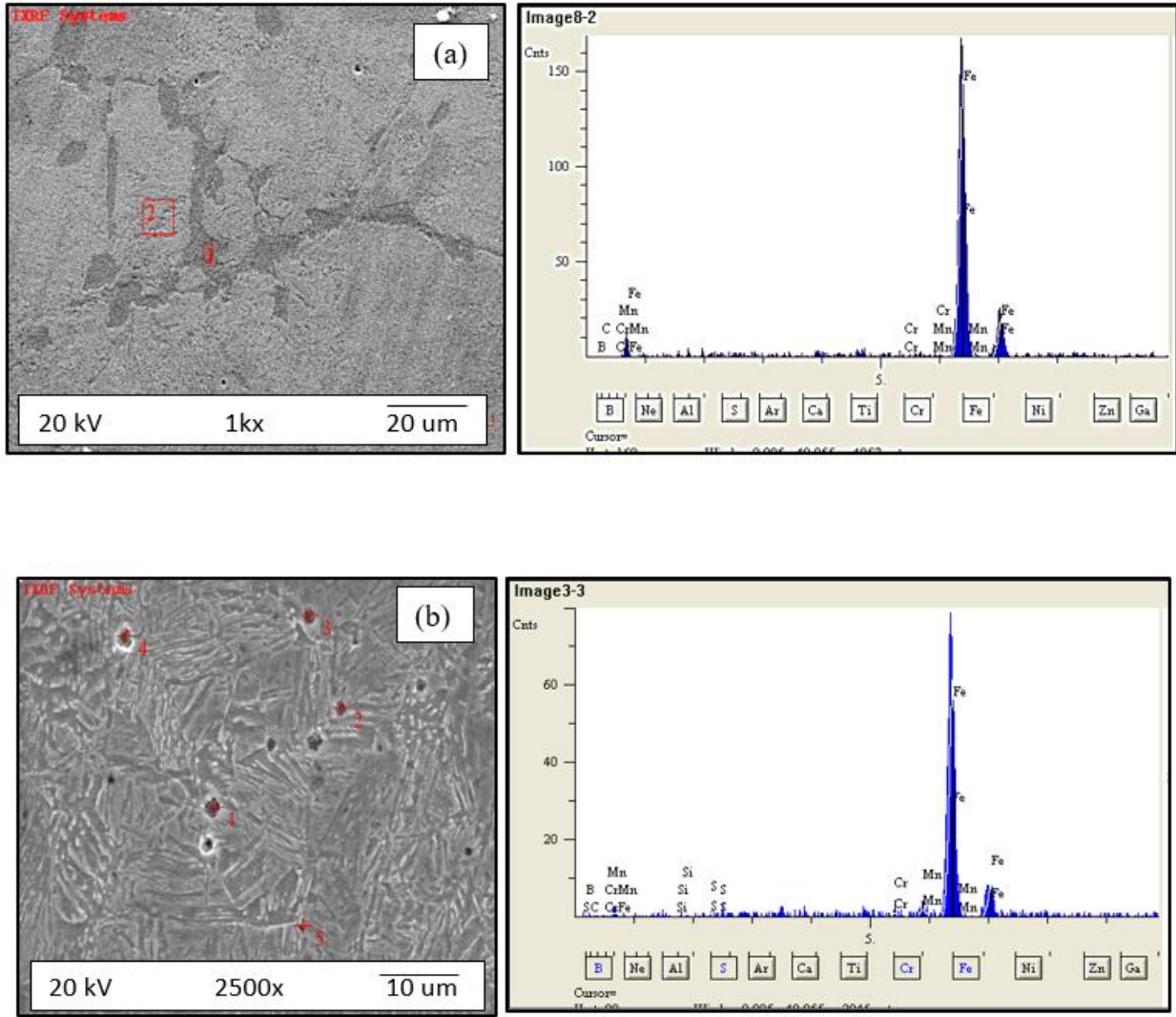


Figure 3. EDS analysis of cryogenic treated samples (a) 33B+K (b)33B+TK (*Kriyojenik işlemlenmiş numunelerin EDS analizleri*)

The macro hardness values taken from each sample according to HV1 are shown in Figure 4. The average values of the hardness values taken from 10 different points are given in the graph. The lowest hardness value was observed in the sample that underwent cryogenic treatment after forging. This is

thought to be due to the increase in grain size as seen from the microstructures. The highest hardness was obtained in 33B+TK specimen as 613 HV1. At the same time, it is thought that the spherical carbides in the 33B+TK sample may increase the hardness. The hardness values of the forged and tempered samples are similar to the literature [27,29,30].

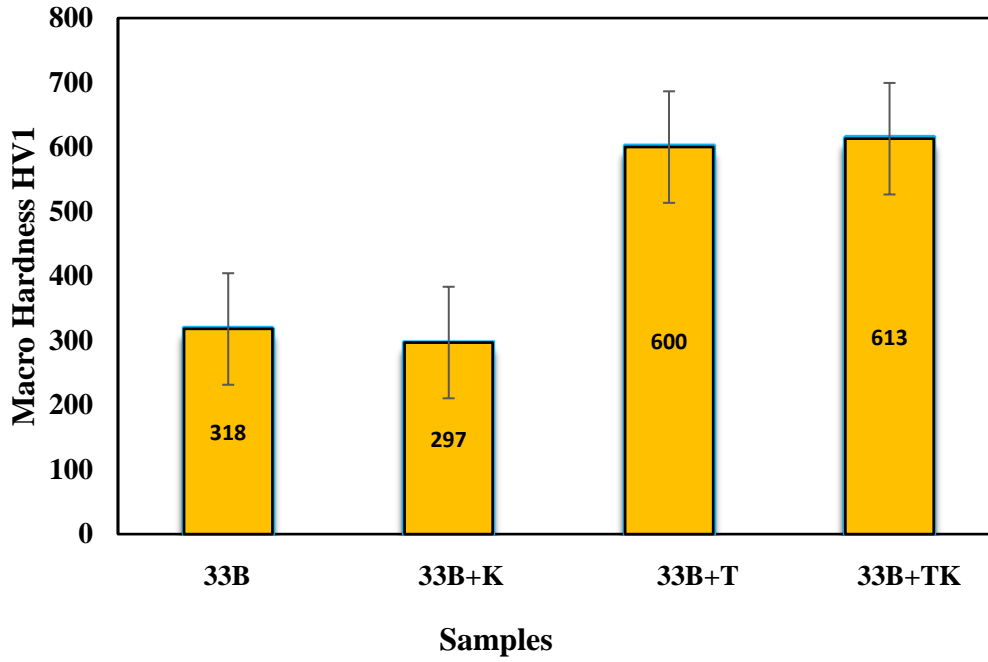


Figure 4. Samples HV1 hardness values (*Numunelerin HV1 sertlik değerleri*) Table 2 shows the weight losses in the material after the wear test. The least weight loss was measured in the 33B+TK sample. Tempering and cryogenic treatment (33B+TK) were found to improve wear resistance by 55% compared to sample 33B. This is thought to be due to the cryogenic process, which reduces the amount of retained austenite and strengthens the interatomic bonds.

Table 2. Weight losses in samples after wear test/ (*Aşınma testi sonrası numunelerin ağırlık kayıpları*)

Samples	Weight Loss (mg) 1000 meters
33B	0.0028
33B+K	0.0031
33B+T	0.0022
33B+TK	0.0013

XRD graphics of the samples with X-ray analysis are shown in Figure 5. It is seen that all samples are in the (110) plane of the main peak. The crystallite size of all samples was calculated with the FWHM value obtained by XRD analysis. These calculations were made using the Williamson–Hall equation (eq.1) [28].

$\beta \cdot \cos\theta = k \cdot \lambda / D + 4\epsilon \sin\theta$ (1) where; β = FWHM $k=0.94$ $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ (Cu-K α) D = refers to the crystallite size

As a result of the calculations, the crystallite size of the 33B sample was found to be 100.43 \AA and the 33B+K sample was 170.12 \AA . Microstructural analyzes also support this situation. These calculations proved that the cryogenic treatment caused an increase in grain size. At the same time, it was seen in Figure 4 that the hardness value was the lowest in the 33B+K sample when the cryogenic treatment was applied alone. This situation directly relates to the Hall Petch effect [25].

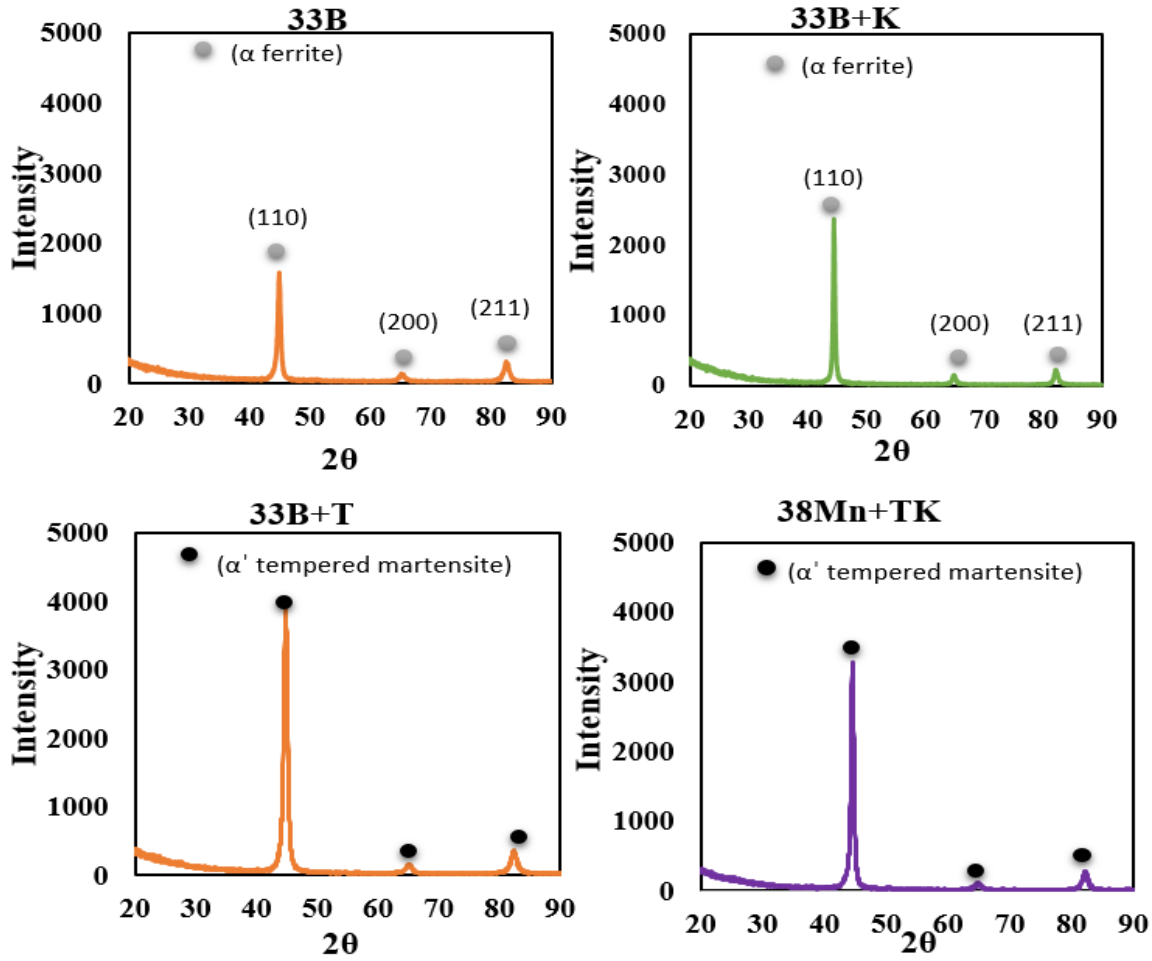


Figure 5. XRD pattern of samples(Numunlerin XRD desenleri)

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, after the 33MnCrB5-2 material in the boron steel group was shaped by forging method, some of the samples were cryogenically treated and the other part was cryogenically treated after quenching and tempering, and how it affected the microstructure and mechanical properties were investigated. The following results were obtained from the experimental studies:

- The hardness value was measured as 293 HV1 in the sample that underwent cryogenic treatment after forging at least.
- It has been determined that the abrasion resistance of 33B+TK samples, which have been tempered and cryogenically treated, has increased by approximately 55% compared to the raw material.
- By XRD analysis, the largest crystal size was found to be 170.12 Å in the 33B+K sample.

- It was observed that the precipitate forms changed in the microstructure of the 33B+TK sample that was tempered and cryogenically treated.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Gazi University Scientific Research Project Program (Project No FYL-2021-7393). We thank Gazi University for their financial support and laboratory facilities.

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)

Gözde ALTUNTAŞ: She completed the microstructure characterization, XRD analysis, wear test, hardness measurements and article writing.

Mikro yapı karakterizasyonu, XRD analizi, aşınma testi, sertlik ölçümleri ve makale yazımını tamamladı.

Ömer Faruk KAPLAN: Made the material supply, forging process and heat treatment processes

Malzeme temini, dövme işlemi ve ısıtma işlemlerini yaptı.

Bülent BOSTAN: He followed all the experimental processes. He made comments after each analysis.

Tüm deneysel süreçleri takip etti. Her analizden sonra yorum yaptı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Shi, Z., Wang, J., Chai, X., Wang, S., Chen, G., & Wang, R. (2020). Effect of boron on intragranular ferrite nucleation mechanism in coarse grain heat-affected zone of high-nitrogen steel. *Materials Letters*, 258, 126819. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105333>

[2] Terzic, A., Calcagnotto, M., Guk, S., Schulz, T., & Kawalla, R. (2013). Influence of Boron on transformation behavior during continuous cooling of low alloyed steels. *Materials Science and Engineering: A*, 584, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.010>

[3] Koley, S., Karani, A., Chatterjee, S., & Shome, M. (2018). Influence of boron on austenite to ferrite transformation behavior of low carbon steel under continuous cooling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 3449-3459. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3459-7>

[4] Brown, A., Garnish, J. D., & Honeycombe, R. W. K. (1974). The distribution of boron in pure iron. *Metal Science*, 8(1), 317-324. <https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.317>

[5] Williams, T. M., Stoneham, A. M., & Harries, D. R. (1976). The segregation of boron to grain boundaries in solution-treated Type 316 austenitic stainless steel. *Metal Science*, 10(1), 14-19. <https://doi.org/10.1179/030634576790431471>

[6] Lanier, L., Metauer, G., & Moukassi, M. (1994). Microprecipitation in boron-containing high-carbon steels. *Microchimica Acta*, 114, 353-361. <https://doi.org/10.1007/BF01244562>

[7] Antunes, J. P. G., & Nunes, C. A. (2017). Characterization of impact toughness properties of DIN39MnCrB6-2 steel grade. *Materials Research*, 21. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0332>

[8] Melloy, G. F., Summon, P. R., & Podgursky, P. P. (1973). Optimizing the boron effect. *Metallurgical transactions*, 4, 2279-2289. <https://doi.org/10.1007/BF02669367>

[9] Sakuraya, K., Okada, H., & Abe, F. (2006). Influence of heat treatment on formation behavior of boron nitride inclusions in P122 heat resistant steel. *ISIJ international*, 46(11), 1712-1719. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1712>

[10] SF, M., Chapa, M., Valles, P., Quispe, A., & MI, V. (1999). Influence of Ti and N contents on austenite grain control and precipitate size in structural steels. *ISIJ international*, 39(9), 930-936. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.930>

[11] Ishikawa, S., Pfaendtner, J. A., & McMahon Jr, C. J. (1999). The effect of boron on stress-relief cracking of alloy steels. *Materials Science and Engineering: A*, 272(1), 16-23. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00457-8)

[12] Yamanaka, K., & Ohmori, Y. (1977). Effect of boron on transformation of low-carbon low-alloy steels. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 17(2), 92-101. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.17.92>

[13] Morri, A., Ceshini, L., Pellizzari, M., Menapace, C., Vettore, F., & Veneri, E. (2017). Effect of the austempering process on the microstructure and mechanical properties of 27mncrb5-2 steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(2A), 643-651. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0094>

- [14] So, H., Faßmann, D., Hoffmann, H., Golle, R., & Schaper, M. (2012). An investigation of the blanking process of the quenched boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.006>
- [15] Cho, K. C., Mun, D. J., Kim, J. Y., Park, J. K., Lee, J. S., & Koo, Y. M. (2010). Effect of boron precipitation behavior on the hot ductility of boron containing steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 1421-1428. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0211-9>
- [16] Altuntaş, G., Altuntaş, O., Öztürk, M. K., & Bostan, B. (2022). Metallurgical and Crystallographic Analysis of Different Amounts of Deformation Applied to Hadfield Steel. *International Journal of Metalcasting*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00860-3>
- [17] Altuntaş, O., Güral, A., & Tekeli, S. (2022). Microstructure engineering for superior wear and impact toughness strength of hypereutectoid powder metallurgy steel. *Powder Metallurgy*, 65(2), 101-111. <https://doi.org/10.1080/00325899.2021.1954280>
- [18] Deva, A., Jha, B. K., & Mishra, N. S. (2011). Influence of boron on strain hardening behaviour and ductility of low carbon hot rolled steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(24), 7375-7380. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.030>
- [19] Akhbarizadeh, A., Golozar, M. A., Shafeie, A., & Kholghy, M. (2009). Effects of austenizing time on wear behavior of D6 tool steel after deep cryogenic treatment. *Journal of Iron and Steel Research International*, 16(6), 29-32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60023-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60023-4)
- [20] Shinde, T. (2021). Influence of carbide particle size on the wear performance of cryogenically treated H13 die steel. *Surface Engineering*, 37(9), 1206-1214. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1701858>
- [21] Dhokey, N. B., Maske, S. S., & Ghosh, P. (2021). Effect of tempering and cryogenic treatment on wear and mechanical properties of hot work tool steel (H13). *Materials Today: Proceedings*, 43, 3006-3013. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.361>
- [22] da Silva Septimio, R., Button, S. T., & Van Tyne, C. J. (2016). Processing maps for the analysis of hot workability of microalloyed steels 38MnSiVS5 and 0.39 C1. 47Mn. *Journal of Materials Science*, 51, 2512-2528. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9563-2>
- [23] Jahazi, M., & Eghbali, B. (2001). The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of two microalloyed steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 594-598. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00599-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00599-4)
- [24] Madariaga, I., Gutierrez, I., García-de Andrés, C., & Capdevila, C. (1999). Acicular ferrite formation in a medium carbon steel with a two stage continuous cooling. *Scripta Materialia*, 41(3), 229-235. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00149-9)
- [25] Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta materialia*, 51(8), 801-806. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
- [26] Cahn, J. W. (1959). Free energy of a nonuniform system. II. Thermodynamic basis. *The Journal of chemical physics*, 30(5), 1121-1124. <https://doi.org/10.1063/1.1730145>
- [27] Dini, G., Vaghefi, M. M., & Shafyei, A. (2006). The influence of reheating temperature and direct-cooling rate after forging on microstructure and mechanical properties of V-microalloyed steel 38MnSiVS5. *ISIJ international*, 46(1), 89-92. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.89>
- [28] G. K. Williamson, & W. H. Hall. "X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram, *Acta metallurgica*. 1.1 (1953), 22-31. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(53\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6)
- [29] Barcellona, A., & Palmeri, D. (2009). Effect of plastic hot deformation on the hardness and continuous cooling transformations of 22MnB5 microalloyed boron steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 1160-1174. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9790-8>
- [30] El-Shennawy, M., Farahat, A. I., Masoud, M. I., & Abdel-Aziz, A. I. (2016). Heat treatment effect on micro-alloyed low carbon steel with different Boron content. *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, 5(4), 9-20.

17-4 PH Paslanmaz Çeliğin MoS₂ Nanoakışkan Koşulları Altında Sürtünme/Aşınma Performansının İncelenmesi

Emine ŞİRİN^{1*} 

¹Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/01/2023
Revision: 03/03/2023
Accepted: 17/03/2023

Anahtar Kelimeler

17-4 PH
Pin-disk
Sürtünme/aşınma,
Nanoakışkan

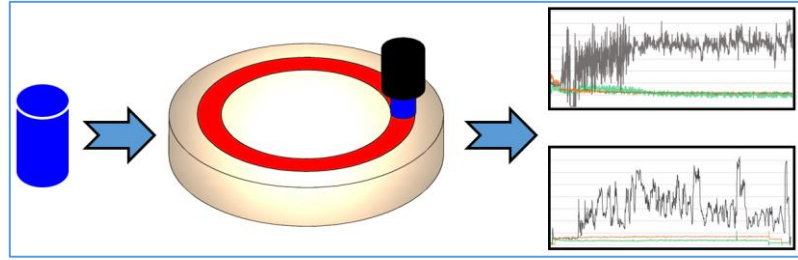
Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2023
Düzeltilme: 03/03/2023
Kabul: 17/03/2023

Keywords

17-4 PH
Pin-on-disc
Friction/Wear
Nanofluids

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)



Şekil A: Grafiksel sunum /Figure A: Graphical representation

Önemli noktalar (Highlights)

- 17-4 PH paslanmaz çeliğin sürtünme-aşınma performansı araştırıldı. / Friction-wear performance of 17-4 PH stainless steel was investigated.
- Performans kriterleri olarak sürtünme katsayısı, titreşim, aşınma analizi, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik seçilmiştir. / The coefficient of friction, vibration, wear analysis, surface roughness, and microhardness was selected as performance criteria.
- MoS₂ nanoakışkanı tüm kriterlerde en iyi performansı sergilemiştir. / MoS₂ nanofluid showed the best performance in all criteria.

Amaç (Aim): Bu çalışmada nanoakışkan koşullarının 17-4 PH paslanmaz çeliği üzerine sürtünme/aşınma performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. / This study aims to investigate the friction/wear performances of nanofluid conditions on 17-4 PH stainless steel.

Özgünlük (Originality): 17-4 PH paslanmaz çeliğin nanoakışkan koşullarında değerlendirilmesinde sürtünme katsayısı, titreşim seviyesi, yüzey kalitesi ve aşınma durumu incelenmiştir. / In evaluating 17-4 PH stainless steel under nanofluid conditions, friction coefficient, vibration level, surface quality, and wear condition were investigated.

Bulgular (Results): MoS₂ nanoakışkan koşulu kuru koşula göre sürtünme katsayısını% 74,51, titreşim seviyesini% 87,22, yüzey pürüzlülüğünü % 38,69 ve mikrosertliği % 6,41 azaltmıştır. / MoS₂ nanofluid condition reduced friction coefficient by 74.51%, vibration level by 87.22%, surface roughness by 38.69%, and microhardness by 6.41% compared to dry condition.

Sonuç (Conclusion): Genel olarak değerlendirildiğinde, MoS₂ nanoakışkan koşulu 17-4 PH malzemede yağ ve kuru koşula kıyasla daha iyi sürtünme/aşınma performansı sergilemiştir. / Overall, the MoS₂ nanofluid condition exhibited better friction/wear performance in 17-4 PH material compared to oil and dry condition.



17-4 PH Paslanmaz Çeliğin MoS₂ Nanoakışkan Koşulları Altında Sürtünme/Aşınma Performansının İncelenmesi

Emine ŞİRİNİ*

¹Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/01/2023
Revision: 03/03/2023
Accepted: 17/03/2023

Anahtar Kelimeler

17-4 PH,
Pim-Disk,
Sürtünme/aşınma,
Nanoakışkan

Öz

Bu çalışmada 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin farklı koşullar altında, sürtünme/aşınma performansları incelenmiştir. Deneyler kuru, baz sıvı (bitkisel bazlı yağ) ve molibden de sülfür (MoS₂) nanoakışkan koşulları altında gerçekleştirilmiştir. MoS₂ nanoakışkanın çökeltme veya topaklanmasının önüne geçme adına karışıma sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanı ilave edilmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde bir pim-disk test cihazı kullanılmıştır. Deneylerde performans değerlendirilmesinde, sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim seviyesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve pim yüzey aşınması kullanılmıştır. Pim-disk deneyleri sonucu elde edilen verilere göre, MoS₂ nanoakışkan koşulunun diğer koşullara göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. MoS₂ nanoakışkan koşulu kuru koşula göre sürtünme katsayısı, titreşim ortalaması, yüzey pürüzlülük Ra ve mikrosertlik değerlerini sırasıyla % 74,51, % 87,22, % 38,69 ve % 6,41 oranında azaltmıştır.

Investigation of Friction/Wear Performance of 17-4 PH Stainless Steel under MoS₂ Nanofluid Conditions

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2023
Düzeltilme: 03/03/2023
Kabul: 17/03/2023

Keywords

17-4 PH,
Pin-on-disc,
Friction/wear,
Nanofluid

Abstract

This study investigated the friction/wear behaviour of 17-4 PH stainless steel material under different conditions. Experiments were carried out under dry, base liquid (vegetable-based oil) and molybdenum disulfide (MoS₂) nanofluid conditions. Sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant was added to the prepared mixture due to prevent sedimentation or agglomeration of the MoS₂ nanofluid. A pin-on-disc tester was used in the friction/wear experiments. The coefficient of friction, microhardness, vibration level, average surface roughness (Ra) and pin surface wear were used to evaluate the performance in the experiments. According to the data obtained as a result of pin-on-disc experiments, it was determined that the MoS₂ nanofluid condition showed the best performance compared to the conditions. MoS₂ nanofluid condition decreased friction coefficient by 74.51%, vibration average by 87.22%, Ra value by 38.69%, and microhardness values by 6.41% compared to dry condition.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birçok endüstride yüksek korozyon direnci ve mukavemeti yüksek malzemelere olan talep her geçen gün artış göstermektedir. 17-4 PH, kimyasal içeriğinde % 17 krom (Cr) ve % 4 nikel (Ni) barındıran yüksek korozyon ve sıcaklık direnci, iyi süneklik ve yüksek mukavemet özelliği sergileyen paslanmaz çelik malzemeleri arasındadır. 17-4 PH paslanmaz çelikler günümüz sanayisinde, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, füze gövdelerinde, deniz taşıtlarının parçalarında, yakıt tanklarında, uçakların iniş-kalkış takımlarında, pompalarda, millerde, somun, civata, kesici aletler ve

kavramalarda yoğun olarak tercih edilmektedirler [1–4]. Ancak bu kadar yaygın kullanılmalarına rağmen, 17-4 PH paslanmaz çelik malzemeler yüksek mukavemet ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle son derece zor şekillendirilebilmektedirler [5]. Sürtünme/aşınma, malzeme kaybı ve enerji tüketimine neden olan en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Şekillendirme proseslerinde verimliliği artırmak, makine ekipmanların ömrünü uzatmak adına sürtünme katsayısının ve aşınma düzeyinin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır [6,7]. Bu durum uygun yağlama tekniklerinin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir [8]. Yağlama sayesinde

birbiriyle temas halinde olan iki yüzey arasında sürtünme minimize olmakta ve enerji verimliliği sağlanabilmektedir. Ayrıca yağlayıcı tribofilm tabakası, yüzeylere nüfuz ederek hasarların önüne geçebilmektedir. Bu amaçla özellikle sürtünme kaynaklı oluşan yüzey hasarlarını, ortama yağlayıcı ajan göndererek geciktirmek mümkündür. Global ölçekte kullanılan yağlar petrol bazlı oldukları için çevre ve çalışan sağlığı açısından son derece zararlı olabilmektedir. Petrol bazlı yağların kullanımını azaltan veya ortadan kaldıran yeni yöntemler geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [9]. Bu nedenle, çeşitli endüstriler ekolojik ve çevreye duyarlı sürdürülebilir imalat teknikleri aramaktadırlar. Son zamanlarda özellikle petrol bazlı yağlar yerine bitkisel bazlı yağların tercih edildiği çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bitkisel bazlı yağlar biyolojik olarak bozunabilmesinin yanında toksik olmamaları, dönüştürülebilir ve yenilenebilirlik gibi özelliklere sahiptirler [10]. Ne var ki yağlar, ağır koşullarda etkinliğini yitirebilmekte veya yüzey hasarlarının hızlı gelişimine bir noktadan sonra engel olamamaktadırlar. Bu amaçla özellikle ekolojik bitkisel bazlı yağların etkinliğini artırmak adına sıvı içerisine yağlayıcılık sağlayan, katı nano parçacıklar eklenebilmektedir. Nanopartikül adı verilen bu zerrecikler, bir akışkan içerisine genelde 1-100 nm boyutlarında eklenmektedir. Katı halde üstün yağlayıcılık, ısı taşıma kapasitelerinin yüksek olması, mekanizma oluşturması bu zerrecikleri çok iyi bir katkı maddesi alternatifi haline getirmiştir. Nanopartiküller metal esaslı, karbon esaslı, seramik esaslı olmak üzere farklı yapıda olabilirler. Ancak literatürde en fazla hBN, MoS₂, grafen, grafit, TiO₂, SiO₂ vb. nanopartiküllerin kullanıldığı görülmektedir. MoS₂ nanopartikülleri Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulan zayıf etkileşimli katmanları sayesinde, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı oluşturmaktadırlar [11,12]. Bu sebeple MoS₂, yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren katı yağlama, nanoakışkanlar ve kendinden yağlamalı polimer malzemeler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir [13,14]. Farklı boyutlarda veya şekillerde bir sıvının içerisine nanopartikül eklenmesiyle oluşan karışıma nanoakışkan adı verilmektedir. Nanoakışkanlar, üstün yağlayıcılık ve yüksek ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanım potansiyeline sahiptirler. Nanoakışkanlar kayan yüzeyler arasında tamir etkisi, yuvarlanma etkisi, parlatma etkisi ve koruyucu film oluşumu ile daha etkili yağlama yaparak aşınma ve sürtünmeyi azaltmaktadırlar. Ayrıca çok az miktarda yağ kullanılması nedeniyle

hem ekonomik hem de çevreyi ve çalışan sağlığını korumaktadır.

Literatürde nanoakışkanlarla yapılan bazı çalışmalara aşağıda değinilmiştir. Akıncioğlu ve Şirin, AISI 316 L malzemeye kuru, yağ ve hBN ilaveli nanoakışkan koşullarında aşınma ve sürtünme testi uygulamışlardır. Araştırmacılar bilye-disk test cihazında ve farklı yükler (2 N, 5 N ve 8 N) altında gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, hBN ilaveli nanoakışkan koşulunun en iyi sonucu gösterdiğini ifade etmişlerdir [15]. Yücel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mineral esaslı yağ içerisine MoS₂ nanopartikülleri ekleyerek nanoakışkan elde etmişlerdir. Yüzey kalitesi ve sıcaklık değerlerinde önemli oranlarda iyileştirmeler elde ettiklerini iddia etmişlerdir [16]. Hu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada parafin ile birleştirdikleri MoS₂ nanopartiküllerin, parafinin özelliğini iyileştirdiği için aşınma ve sürtünme açısından iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [14]. Shi ve arkadaşları [17], yaptıkları çalışmada katkısız parafin yağı ve Cyanex 301 ile modifiye edilmiş MoS₂ mikropartikülü içeren parafin yağının, tribolojik özelliklerini test etmişlerdir. Çalışmada MoS₂ içeren parafin yağının iyi bir sürtünme/aşınma önleyici özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ünlüoğlu ve Çelik yaptıkları çalışmada AISI H11 çeliğinin kuru, yağ ve farklı oranlarda (ağırlıkça % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25) grafit katkılı nanoakışkanlarla sürtünme/aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, bilye-disk test cihazı ile grafit partiküllerinin yağın aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [18]. Kumar ve Reddy Ti-6Al-4V ve EN 31 malzemenin kuru, ıslak ve MoS₂ nanoakışkan koşulları altında pim-disk test cihazı ile sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. MoS₂ nanoakışkan koşullarının sürtünme ve aşınma davranışlarını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [19]. Şirin ve arkadaşları, Titanyum Grade 2 malzemeye kuru, baz sıvı ve bitkisel esaslı yağ içerisine hBN ve GNPs ilaveli nanoakışkan koşullarında pim disk test cihazı ile sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Nanoakışkan koşulunun diğer koşullara göre sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, titreşim değerlerinde önemli oranda düşüşler sağladığını gözlemlemişlerdir [20]. Yıldırım ve arkadaşları, Waspaloy süperalaşım malzemeyi kuru, bitkisel esaslı baz sıvı ve CuO ve ZnO ilaveli nanoakışkan koşullarına sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Nanoakışkan koşullarının tribolojik özellikleri iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [21].

Literatür araştırmalarından elde edilen veriler ışığında nanoakışkanların malzeme şekillendirme proseslerinde son derece olumlu etkiler gösterdiği anlaşılmıştır. Buradan yola çıkarak bu çalışmada 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin kuru, yağ ve MoS₂ ilaveli nanoakışkan koşullarında sürtünme/aşınma davranışları incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim seviyesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve pim yüzey aşınması performans kriteri olarak tercih edilmiştir. Çalışma sonunda farklı nanoakışkan yağlama koşullarının sürtünme/aşınma davranışları incelenerek literatüre

katkıda bulunulması amaçlanmaktadır. Çalışmaya ait detaylar, bulgular, tartışma ve sonuçlar aşağıda bölümler halinde sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Sürtünme/aşınma testlerinde 10 mm çapında 20 mm uzunluğunda 17-4 PH paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. 17-4 PH paslanmaz çelik numunelere ait kimyasal bileşim Tablo 1’de ve mekanik özellikler Tablo 2’de sunulmuştur.

Table 1. 17-4 PH malzeme kimyasal bileşimi (%) (Chemical composition of 17-4 PH material (%))

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S
0,014	0,298	0,805	4,510	15,289	0,133	3,125	0,0215

Table 2. 17-4 PH malzeme mekanik özellikleri (Mechanical properties of 17-4 PH material)

Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
1090	910	15	355

Sürtünme/aşınma testleri öncesi her bir numune temas yüzeyine sırasıyla 200, 600, 100 ve 1200 SiC zımpara ile aşındırma işlemi uygulanmıştır. Son olarak ayna görüntüsünün elde edilmesi adına sırasıyla 6 ve 3 µm Metkon Diapat elmas parlaticı kullanılmıştır. Sürtünme/aşınma deneylerinde Türkyus pim-disk test cihazı kullanılmıştır. Pim-disk test cihazı her ölçüm öncesinde kalibre edilerek verilerin doğruluğu sağlanmıştır. Testler ASTM G99-05 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 17-4 PH pim malzemesine karşı sertleştirilmiş AISI D2 soğuk iş takım çeliği diski kullanılmıştır. Her deney öncesinde disk yüzeyi dikkatli temizlenerek testlere hazır hale getirilmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Sürtünme/aşınma test koşulları

(Friction/wear testing conditions)

Pim malzemesi	17-4 PH
Disk malzemesi	AISI D2 (56 HRC)
Devir	500 dev/dak
İz çapı	40 mm
Süre	30 dak (1800 sn)
Toplam yol	1884900 mm
Örnekleme frekansı	3 Hz

Nanoakışkanların hazırlanma prosesi kullanım kolaylığı ve maliyetten tasarruf için iki-adım

yöntemi tercih edilmiştir. İki adım yönteminde akışkan sıvı içerisine nanopartiküller doğrudan eklenerek nanoakışkan karışımlar elde edilmektedir. Nanoakışkan karışım hazırlamada baz sıvı olarak Falcon K 151 bitkisel esaslı sentetik yağ kullanılmıştır. Bitkisel esaslı yağa ait teknik özellikler Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Bitkisel yağa ait teknik özellikler

(Technical properties of vegetable oil)

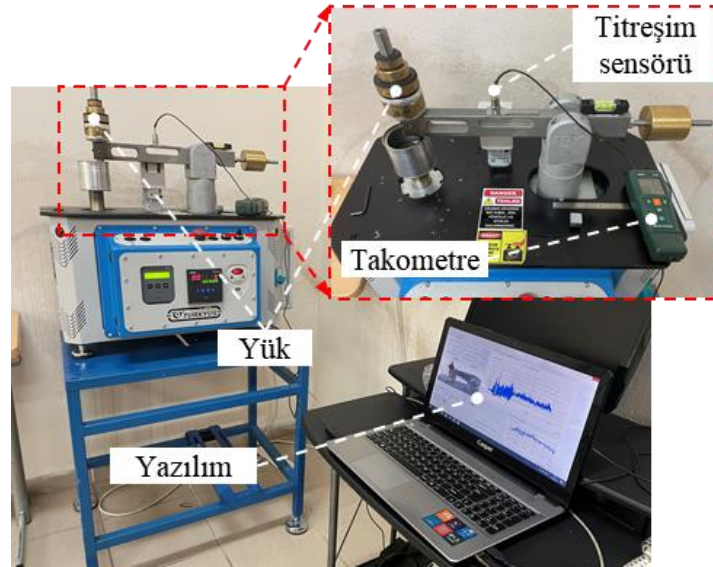
Görünüm	açık sarı
Viskozite (40°C’de)	8,5 mm ² /s ASTM D 7042
Yoğunluk (20°C’de)	0,860 g/cm ³ ASTM D 7042
Alevlenme noktası	200 °C DIN EN ISO 2592

Bitkisel esaslı yağ içerisine literatürden elde edilen bilgilere göre, hacimce % 0,65 oranında MoS₂ nanopartikülleri eklenerek nanoakışkan karışımlar elde edilmiştir. Nanoakışkan karışımlarda karşılaşılan en büyük zorluk topaklanma veya çökeltmedir. Araştırmacılar topaklanma ve çökeltmenin kısmen önlenmesi veya raf ömrünü artırmak için farklı sürfaktanları nanoakışkan karışımlara eklemiştir. Karışımın stabilitesinin sağlanması adına bu çalışmada sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanı kullanılmıştır. SDS, organik bir bileşik olup anyonik sürfaktan özelliği sergilemektedir. Nanoakışkanların çökeltme veya

topaklanmasını önleme adına nanopartikül ağırlığının % 0,25 oranında SDS sürfaktanı karışıma eklenmiştir. Karışım prosesi üç farklı adımda uygulanmıştır. Birinci karıştırma prosesinde bitkisel esaslı yağın içerisine önce sürfaktan eklenerek 800 dev/dak ile 10 dakika boyunca bir mekanik karıştırıcı ile karışıma başlanmıştır. Mekanik karıştırıcı karışıma devam ederken MoS₂ nanopartikülleri eklenerek karışıma 50 dakika daha devam edilerek ilk karıştırma prosesi bitirilmiştir. Ardından ikinci karıştırma prosesinde Bandelin Sonopuls HD3200 ultrasonik homojenizatör kullanılarak karışıma 30 dakika daha devam edilmiştir. Üçüncü ve son karıştırma prosesinde ise Termal N11151M manyetik karıştırıcı ile 1500 dev/dak 60 dakika süreyle karışım nihayete erdirilmiştir. Elde edilen MoS₂ nanoakışkan karışımı taze bir şekilde bekletilmeden testlerde kullanılmıştır.

Sürtünme/aşınma testleri esnasında titreşim seviyelerinin tespit edilmesinde Extech 461880 titreşim takometresi kullanılmıştır. Tüm titreşim ölçümleri manyetik sensör test cihazının koluna sabitlenerek kayıt altına alınmıştır. Titreşim tepe değerleri dikkate alınarak ölçümler sürtünme aşınma test süresince devam ettirilmiştir. Böylece sürtünme/aşınma testleri esnasında meydana gelen

titreşimlerin analiz tahmini yapılması hedeflenmiştir. Sürtünme/aşınma testleri sonrasında ise aşınan yüzeylere ait fotoğrafların elde edilmesinde Dino Lite AM791MZT dijital mikroskobu kullanılmıştır. Aşınan yüzeylerin pürüzlülük tespitinde Mahr Marsurf PS10 mobil pürüzlülük ölçer kullanılmıştır. Pürüzlülük cihazının kalibrasyonu her ölçüm öncesinde doğrulama mastarı ile sağlanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ISO 4287 standardı dikkate alınmış olup, değerlendirme kriteri olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra tercih edilmiştir. Ölçüm mesafesi standartlara göre 4,8 mm olarak alınmış olup, aşınan yüzeylerin aynı noktasında üç farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen üç farklı yüzey pürüzlülük ölçümün aritmetik ortalaması alınarak Ra sonuçları elde edilmiştir. Aşınan 17-4 PH paslanmaz çelik pim malzemelerin dış silindirik yüzeylerinden itibaren 10 µm mesafe ile beş adet mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerde Metkon Duroline M mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri ASTM E384-17 standardına göre 1000 gf yük ve 15 saniye bekleme zamanına göre yürütülmüştür. Deney setine ait görüntü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sürtünme-aşınma deney seti (Friction-wear test set-up)

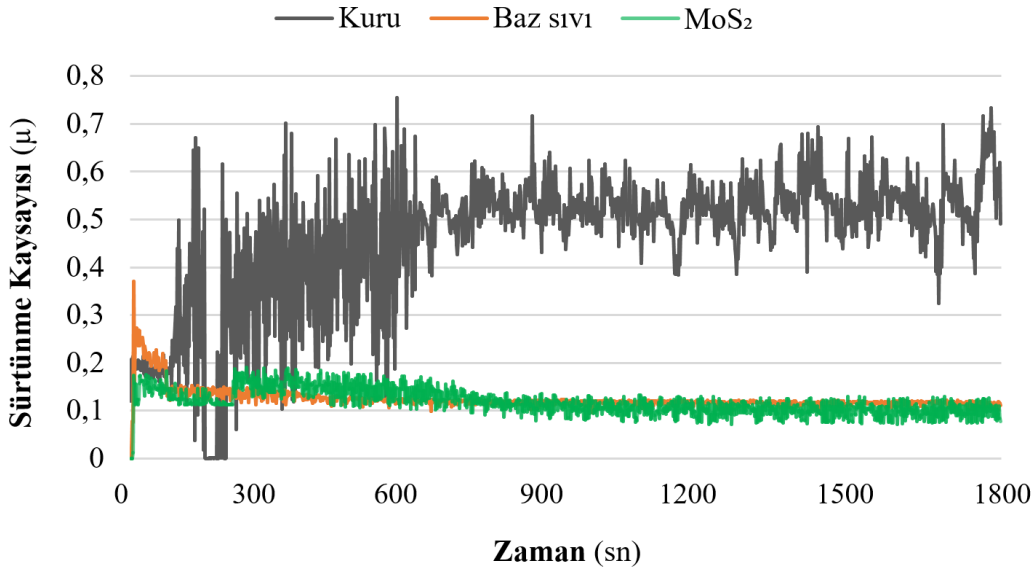
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Sürtünme Katsayısının Değerlendirilmesi (Evaluation of Coefficient of Friction)

Birbiriyle temas halinde çalışan parçalarda oluşan sürtünme, makine parçalarının çalışma ömrünü ve çalışma verimini etkilemektedir. Malzemelerin sürtünme/aşınma davranışı farklı koşullarda değişiklik gösterebilmektedir. Sürtünme ve

aşınmayı önlemek için çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır. 17-4 PH paslanmaz çeliğinin aşınma testlerinde elde edilen sürtünme katsayı değerleri, farklı koşullarda (kuru, baz sıvı ve MoS₂) değerlendirilmiştir. Sürtünme katsayısının zamana göre değişimi, Şekil 2’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı trendinin beklenildiği üzere kuru koşulda gerçekleştiği görülmektedir. Sürtünme/aşınma testinin 600 sn. süresine kadar değişken olan grafik, sonrasında nispeten daha düzenli hale gelmiştir. Bu durum 17-4 PH malzemenin rodaj süresinin

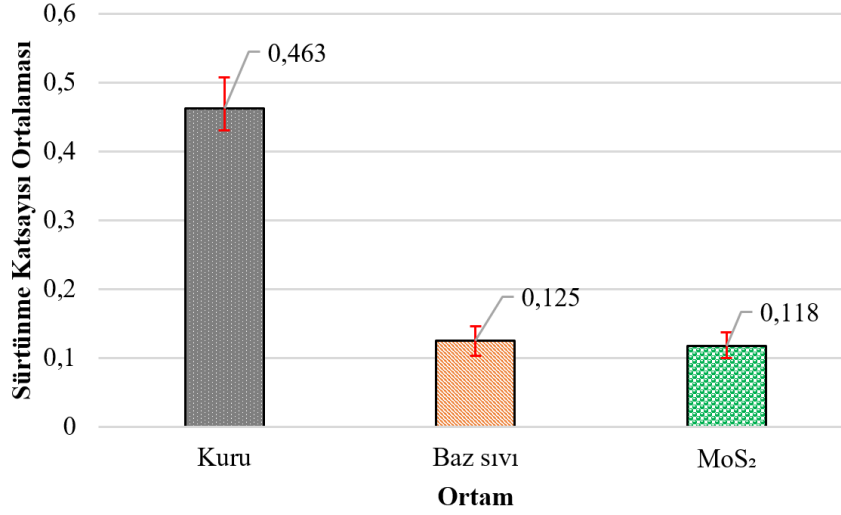
aşılması ile ifade edilebilir. Baz sıvıda elde edilen sürtünme katsayısı trendinin kuru koşula göre iyileşme gösterdiği açıkça görülmektedir. Ancak özellikle MoS₂ nanoakışkan koşulu ile kuru ve baz sıvı karşılaştırıldığında daha stabil ve düzgün bir trendin olduğu anlaşılmaktadır. MoS₂ nanoakışkan koşulunda sürtünme katsayısı değerlerinin nispeten daha düzgün trendde elde edilmesi, katı nanopartiküllerin sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olması, parlatma, yuvarlama, tamir ve yastıklama mekanizmaları ile daha etkili bir tribofilm tabakası oluşumu sağlaması ile açıklanabilir [22].



Şekil 2. Farklı koşullar altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları (The coefficient of friction results obtained under different conditions)

Sürtünme katsayısı ortalamalarını gösteren grafik, Şekil 3’te verilmiştir. Grafik incelendiğinde kuru koşulda sürtünme katsayısı ortalaması 0,463 ile en yüksek değer elde edilmiştir. Bu durum yağlayıcı hiçbir ajanın kullanılmamasıyla ifade edilebilir. Kuru koşulu, baz sıvı 0,125 ile takip etmektedir. Bir başka ifadeyle baz sıvı, kuru koşula göre % 73 oranında azalma göstermiştir. Yağlayıcı ajanın kullanılması ile sürtünen iki yüzeye tribofilm yağlayıcı tabaka oluşması sürtünmenin minimize olmasına yardımcı olmaktadır. Kumar ve Reddy yaptıkları çalışmada kuru koşula göre nanoakışkan kullanımı ile sürtünme katsayılarının düştüğünü ifade etmişlerdir [19]. MoS₂ koşulunda ise 0,118 sürtünme katsayısı ortalaması ile en düşük değer elde edilmiştir. Bir başka deyişle MoS₂ nanoakışkanı, sürtünme katsayısı ortalamasını kuru

koşula göre % 74,51, baz sıvıya göre ise % 5,60 oranında azaltmıştır. Nanopartiküllerin eklendikleri akışkanın yağlama özelliğini artırmada önemli katkılar sağladığı bilinmektedir. Bu durum akışkan içerisinde yer alan nanopartiküllerin sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olması, tamir, parlatma, yuvarlanma ve yastıklama mekanizmaları ile etkili bir tribofilm tabakası oluşturması ile açıklanabilir. Nanopartiküller sürtünen yüzeyler arasında bariyer görevi görerek yüzeyleri kaplamakta, sürtünme ve aşınmayı önleyici özellikler sergilemektedirler [22–24]. Dolayısıyla bu çalışmada da benzer durum olduğundan, nanoakışkan içindeki MoS₂ nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının düşük seviyelerde gerçekleştirilmesine katkı sağladığı düşünülmektedir.



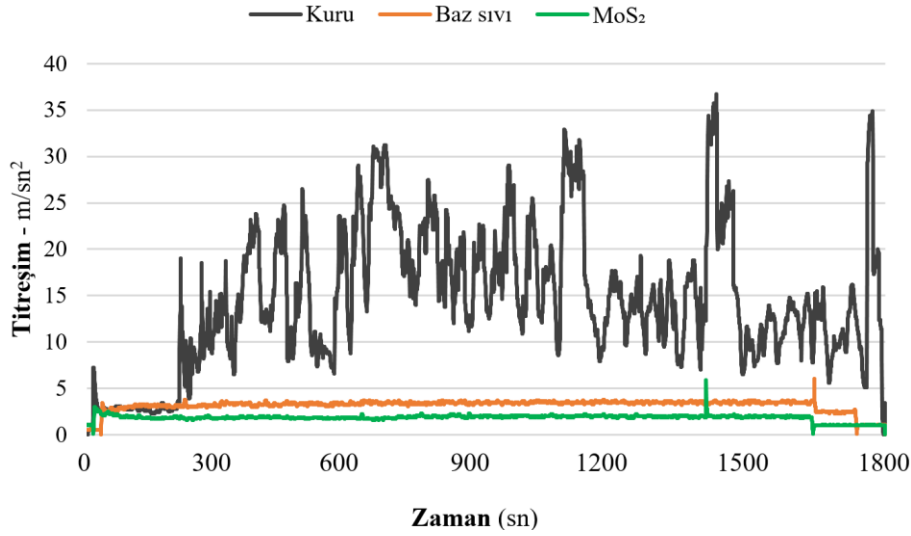
Şekil 3. Sürtünme katsayı değerleri ortalama grafiği (Friction coefficient values average graph)

3.2. Titreşim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

(Evaluation of Vibration Results)

Sürtünme/aşınma deneyleri süresince titreşim seviyelerindeki artış, sürtünme katsayısını belirleyen kuvvet trendini de etkiler. Bu nedenle, titreşim seviyelerin artış göstermesi sürtünme

katsayısını da artırmaktadır. Şekil 4'te sürtünme/aşınma deneyleri süresince meydana gelen değişimler verilmiştir.



Şekil 4. Farklı koşullar altında elde edilen titreşim değerleri (Vibration values obtained under different conditions)

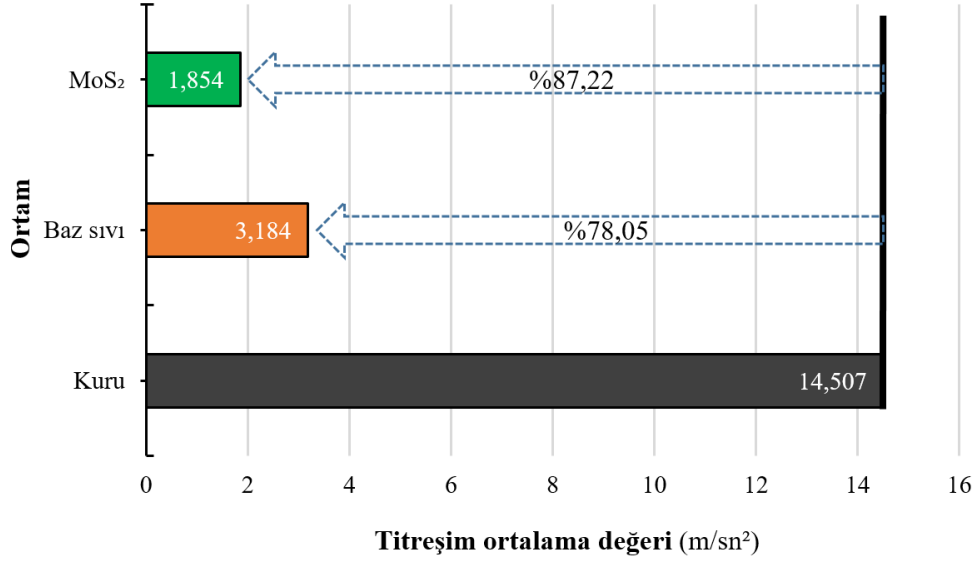
Grafikteki zaman değişimine göre titreşim trendi de değişiklik göstermektedir. Titreşim sonuçları değerlendirildiğinde, kuru koşulda yapılan testlerde titreşim değerleri en yüksek seviyededir. Bu, kuru koşullarda artan sürtünme ile açıklanabilir. Kuru koşulda zamana bağlı olarak titreşim trendinin belirgin oranda değişim gösterdiği görülmektedir. Baz sıvı ve MoS₂ koşullarındaki zamana bağlı değişimin ise daha az seviyelerde olduğu görülmektedir. Akışkan koşulunda gerçekleştirilen

testlerin ilk periyotlarında yüksek olan titreşim trendi, ilk birkaç saniyeden sonra azalmaya başlamıştır. Aşınma sırasında bozulmaya başlayan yüzeyler titreşimi etkileyen en büyük sebeplendir. Yağ koşulunda aşınma daha az olduğu için yüzeyler daha az bozulur ve titreşim de daha az ölçülür. Ayrıca nanoakışkan içeriğindeki nanopartiküller yüzeylerdeki boşlukları doldurarak daha kaliteli yüzeyler oluşturur. Pürüzsüz yüzey

sayesinde titreşim trendinin düşük seviyede olduğu söylenebilir [15,25].

Titreşim ortalama değeri grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde kuru koşuldaki titreşim değerinin ($14,507 \text{ m/sn}^2$) en yüksek, MoS₂ nanoakışkanındaki titreşim değerinin ise en düşük ($1,854 \text{ m/sn}^2$) olduğu görülmektedir. Kuru koşula göre MoS₂ ve baz sıvı değerleri sırasıyla % 87,22 oranında ve % 78,05 oranında azalma göstermiştir. Bu durum sürtünme katsayısı değerleriyle (Şekil 3)

benzerlik göstermektedir. Titreşim değerindeki bu değişim MoS₂ nanoakışkan yağlama koşulunun etkin bir yağlama sağlamasına bağlı olarak sürtünme katsayısını azaltmasına bağlanabilir. Şirin yaptığı çalışmada nanoakışkan koşullarının titreşim seviyelerini azaltmada son derece etkili olduğunu vurgulamıştır [26]. Benzer şekilde nanoakışkan yağlama koşullarındaki etkili tribo film tabakasının yüzeyi koruyarak sürtünmeyi ve titreşimi azaltması ile bu durum açıklanabilir.



Şekil 5. Farklı koşullar altında elde edilen titreşim ortalama değerleri (Vibration average values obtained under different conditions)

3.3. Aşınan Yüzeylerin Değerlendirilmesi

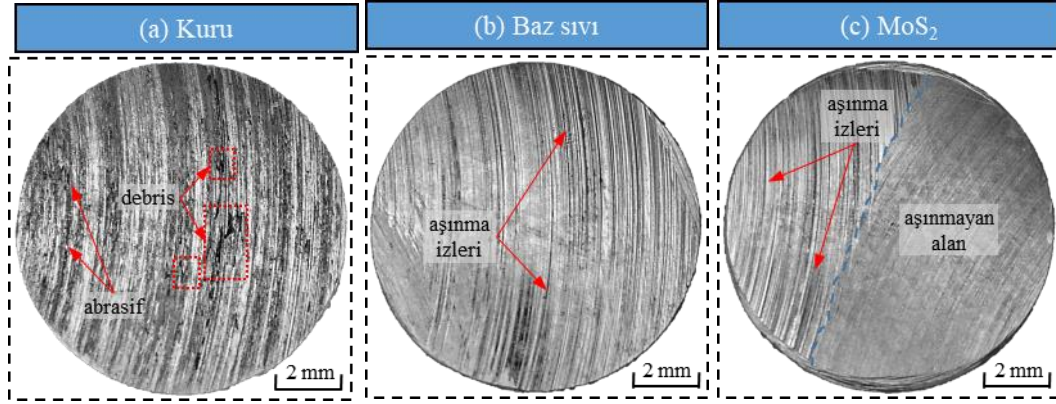
(Evaluation of Worn Surfaces)

Aşınan yüzeylere ait görseller, Şekil 6'da verilmiştir. Mikroskop görüntüleri incelendiğinde, aşınan yüzeylerin kuru koşulda daha geniş alana sahip olduğu görülmektedir. 17-4 PH pim malzemesi ile sertleştirilmiş AISI D2 disk malzemesi sürekli temas halindedir. Temas halindeki pim malzeme yüzeylerinden ayrılan debris kalıntılarının, aşınmayı hızlandırdığı düşünülmektedir. Kopan bu debris oluşumları pim ve disk arasında kayarak aşınma mekanizmalarının hızlı oluşmasına neden olabilmektedir. Alemani ve arkadaşları, aşınma debrislerinin yüzeylerde hasara sebep olduğunu ve aşınma mekanizmalarının oluşumunu hızlandırdığını ifade etmişlerdir [27]. Benzer şekilde kuru koşulda herhangi bir yağlayıcı ajanın kullanılmaması yüzey temasını artırmış, artan yüzey temasıyla aşınan debris parçacıklarının aşınma alanının büyük bir alanda oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Baz sıvı koşulunda

aşınmanın kuru koşula göre nispeten daha az bir alanda gerçekleştiği görülmektedir. Baz sıvının temas halindeki pim-disk yüzeylerinde etkin tribofilm tabakası sayesinde yüzey hasarının sınırlı bir alanda gerçekleşmesini sağladığı anlaşılmaktadır. Ayrıca baz sıvının yüzeylerde aşınma debris oluşumlarını da önlediği anlaşılmaktadır. Sürtünen iki yüzey arasında sınır yağlamanın gerçekleşmesiyle aşınma mekanizmaları gecikmekte ve yüzey hasarlarının nispeten önüne geçilmektedir [28]. Şekil 6c incelendiğinde pim yüzeyinde aşınma alanının en az MoS₂ nanoakışkan koşulunda gerçekleştiği görülmektedir. MoS₂ nanopartikülleri sürtünen pim ve disk yüzeyleri arasında yuvarlanma etkisi göstermesiyle aşınmayı geciktirdiği ön görülmektedir. Ne var ki literatürde yapılan çalışmalarda, nanopartiküllerin bir baz sıvıya eklenmesiyle oluşan nanoakışkanların tamir, yuvarlanma, cilalama, kayma ve yastıklama etkileri sayesinde sürtünmenin minimize edildiği ve aşınmanın geciktiği ifade edilmektedir [22,29].

Yağlayıcıların kullanımı ile yüksek ısı oluşumuna bağlı aşınma tipleri de önlenmektedir [30]. Aşınan yüzeylerde görülen baskın aşınma tipi sert yüzeylerin kayması sonucu malzeme kaybına neden olan çizikler veya olukların oluşturduğu abrasif

aşınmadır. Yine görülen diğer aşınma tipi ise; malzeme üzerinde kopan kalıntıların oluşturduğu adheziv aşınmadır. Aşınan yüzeylere ait görüntüler yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve sürtünme katsayısı sonuçlarını doğrular niteliktedir.

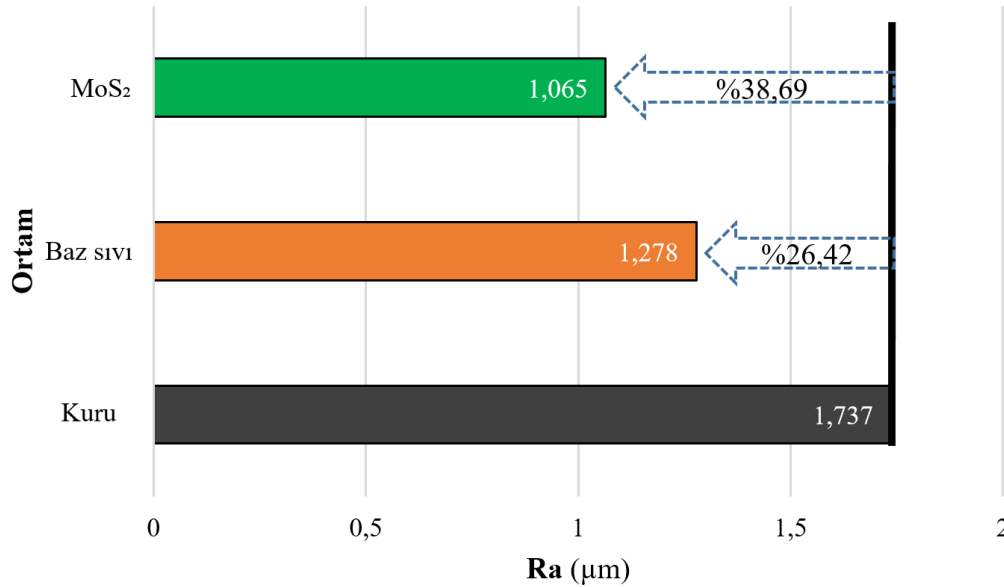


Şekil 6. Farklı koşullar altında aşınan pim yüzeyleri (Pin surfaces worn under different conditions): (a) Kuru (Dry), (b) Baz sıvı (Base fluid), (c) MoS₂ (MoS₂)

3.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Aşınan pim yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük ortalama Ra değerleri, Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’ye göre en yüksek yüzey pürüzlülük değeri hiçbir yağlamanın olmadığı kuru koşulda elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük Ra değeri MoS₂ nanoakışkanın kullanıldığı yağlama koşulunda elde edilmiştir. MoS₂ ve baz sıvıya ait yüzey pürüzlülük

değerleri kuru koşulda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre sırasıyla % 38,69 ve % 26,42 oranında azalma göstermiştir. Yüzey pürüzlülük Ra değerleri Şekil 3’teki sürtünme katsayısı değerleri ile paralellik göstermektedir. Bu durum nanoakışkan yağlama koşulunun sürtünmeyi azaltmasına bağlı olarak, yağlamanın da etkisiyle yüzey pürüzlülük değerinde iyileşmelerin olmasına bağlanabilir.



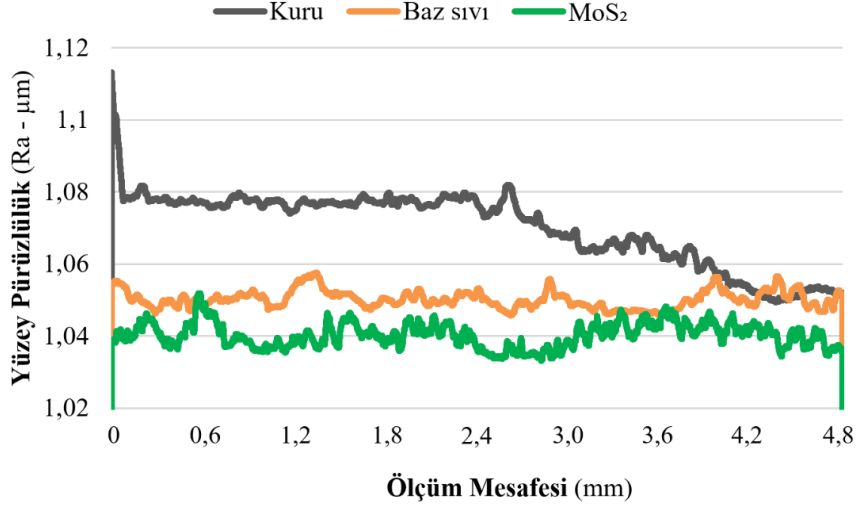
Şekil 7. Farklı koşullar altında elde edilen Ra pürüzlülük değerleri (Ra roughness values obtained under different conditions)

Ölçüm mesafesine göre yüzey pürüzlülük profilleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kuru

koşulda yüzey pürüzlülük değerlerinde daha fazla değişim gözlemlenmektedir. Baz sıvıda bu değişim

trendi kuru koşula göre daha düzenli haldedir. Özellikle MoS₂ nanoakışkan koşulunda kuru ve baz sıvı koşuluna göre daha düzenli ve stabil bir trendin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7 ve Şekil 8 birlikte

değerlendirildiğinde nanoakışkanların oluşturduğu yağlama, tamir, yuvarlanma ve yüzeye tutunma mekanizmalarının etkisi ile yüzey hasarlarını geciktirmesine de atfedilebilir [31,32].



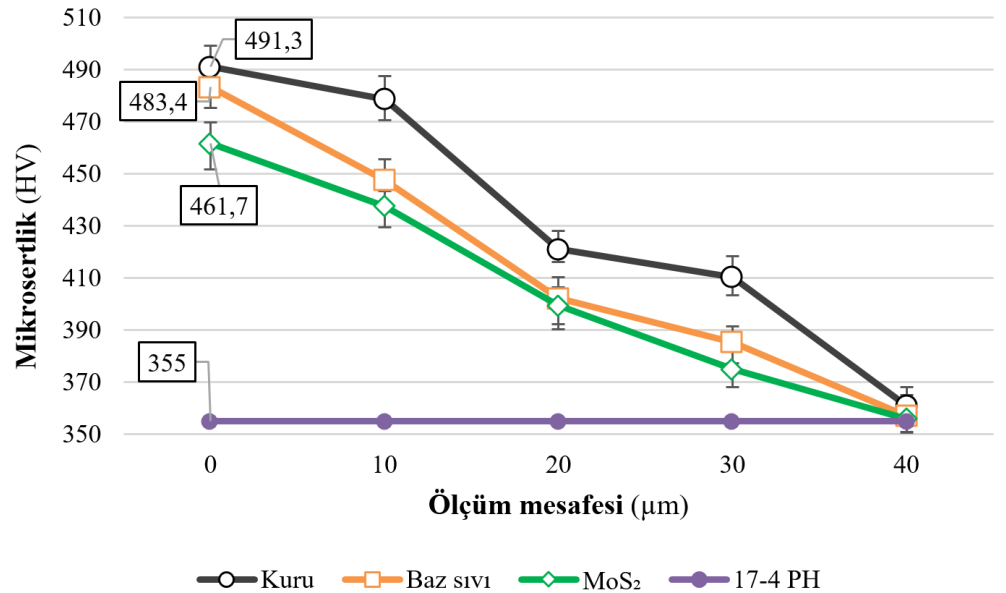
Şekil 8. Farklı koşullar altında elde edilen Ra pürüzlülük profilleri (Ra roughness profiles obtained under different conditions)

3.5. Mikrosertlik Sonuçlarının

Değerlendirilmesi (Evaluation of Microhardness Result)

doğrultuda mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Farklı koşullarda ölçülen mikrosertlik sonuçları Şekil 9’da verilmiştir.

Pim-disk testleri sonrasında aşınan pim yüzeylerin dış yüzeyinden 10 µm mesafede 5 farklı paralel



Şekil 9. Farklı koşullar altında elde edilen mikrosertlik sonuçları (Microhardness results obtained under different conditions)

Mikrosertlik sonuçları değerlendirildiğinde en düşük mikrosertlik değeri (355 HV) işlenmemiş ham malzemede elde edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri (491,3 HV) kuru koşulda elde edilmiştir. Kuru koşullarda daha yüksek ısı üretimine bağlı olarak daha yüksek mikrosertlik değeri görülmektedir. Sürtünme/aşınma testleri sonrasında numunelerin temas bölgelerinde sertlik değerlerinin arttığı grafikten de görülmektedir. Aşınan yüzeydeki 10 µm mesafelerle ölçülen mikrosertlik değerlerine bakıldığında en yüksek değer, aşınma yüzeyine yakın olan mesafede elde edilirken aşınan yüzeyden uzaklaştıkça sertlik değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum aşınma yüzeyinde aşınma esnasında yükün etkisiyle aşınan yüzeyin daha fazla sertleşmesine bağlanabilir. Mikrosertlik sonuçları aşınan yüzey görüntüleri (Şekil 6) ile paralellik göstermektedir. Sürtünme/aşınma testleri sonrası kuru koşula göre mikrosertlik değeri baz sıvıda % 1,63 oranında, MoS₂ nanoakışkanında ise % 6,41 oranında azalma göstermiştir. Bu durum Şekil 7 yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla da açıklanabilir. Nanoakışkanların baz sıvıya göre tribolojik performanslarının daha yüksek olmasına bağlı olarak, aşınma mekanizmalarını geciktirdiği ve yüzey kalitesini iyileştirdiği bilinmektedir [15,33]. Elde edilen sertlik değişimleri sürtünme katsayısı ve titreşim sonuçları ile de örtüşmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada MoS₂ nanoakışkanların PH 17-4 paslanmaz çeliğin sürtünme/aşınma davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma yüzey kriterleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

- En düşük sürtünme katsayısı değerleri MoS₂ nanoakışkan koşulunda elde edilmiştir. Kuru koşuldaki sürtünme katsayısı ortalaması değeri baz sıvı ve MoS₂ ye göre sırasıyla % 73 ve % 74,51 oranında artış göstermektedir.
- MoS₂ nanoakışkan koşulunda elde edilen titreşim ortalaması en düşük değere sahiptir. Titreşim ortalama değerinde, kuru koşula göre MoS₂ ve baz sıvı değerleri sırasıyla % 87,22 oranında ve 78,05 oranında azalma göstermiştir.

- Aşınan yüzeyler incelendiğinde en çok aşınmanın kuru koşulda gerçekleştiği görülmektedir. En az aşınmanın ise MoS₂ nanoakışkan koşulunda gerçekleştiği görülmektedir. Nanoakışkan koşulunda baz sıvıya eklenen nanopartiküllerin aşınmanın azalmasında oldukça etkili olduğu görülmektedir.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değeri hiçbir yağlamanın olmadığı kuru koşulda elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük değeri MoS₂ nanoakışkanın kullanıldığı yağlama koşulunda elde edilmiştir. MoS₂ ve baz sıvıya ait yüzey pürüzlülük değerleri kuru koşulda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre sırasıyla % 38,69 ve % 26,42 oranında azalma göstermiştir.
- Sürtünme/aşınma testleri sonrasında kuru koşula göre mikrosertlik değeri baz sıvıda % 1,63 oranında, MoS₂'de ise % 6,41 oranında azalma göstermiştir.
- Genel olarak nanoakışkan koşulunun 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin sürtünme/aşınma performansını iyileştirildiği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı nanopartikül çeşidi ve farklı karışım oranlarında çalışmalar yapılarak nanoakışkanların sürtünme ve aşınma üzerine etkisi araştırılarak literatüre yeni çalışmalar kazandırılabilir.

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)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Klim Z., Ennajimi E., Balazinski M., Fortin C. Cutting tool reliability analysis for variable feed milling of 17-4PH stainless steel. *Wear*. 1996; 195: 206–213.
- [2] Kochmański P., Nowacki J. Activated gas nitriding of 17-4 PH stainless steel. *Surfaces Coatings Technology*. 2006; 200: 6558–6562.
- [3] Mohanty A., Gangopadhyay S., Thakur A. On applicability of multilayer coated tool in dry machining of aerospace grade stainless steel. *Material Manufacturing Process*. 2015; 31: 869–879.
- [4] Mirzadeh H., Najafizadeh A., Moazeny M. Flow curve analysis of 17-4 PH stainless steel under hot compression test, *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009; 40: 2950–2958.
- [5] Yaşar SA, Uzun G, Korkut İ. 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2020; 10: 71–81.
- [6] Xiong S., Liang D., Wu H., Lin W., Chen J., Zhang B. Preparation, characterization, tribological and lubrication performances of Eu doped CaWO₄ nanoparticle as anti-wear additive in water-soluble fluid for steel strip during hot rolling, *Applied Surface Science*. 2021; 539: 148090.
- [7] Ishikawa T., Choi J. Effect of water adsorption on the frictional properties of hydrogenated amorphous carbon films in various relative humidities, *Langmuir*. 2021;37:1012–24.
- [8] Karthikeyan K.M.B., Vijayanand J., Arun K., Rao V.S. Thermophysical and wear properties of eco-friendly nano lubricants. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39: 285–291.
- [9] Hong S.Y., Broomer M., Hong S.Y., Broomer M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Products and Processes*. 2000; 2: 157–66.
- [10] Shashidhara YM., Jayaram SR. Vegetable oils as a potential cutting fluid-An evolution, *Tribology International*. 2009; 43:1073–81.
- [11] Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J., Giacometti V., Kis A. Single-layer MoS₂ transistors. *Nature Nanotechnology*. 2011; 6: 147–150.
- [12] Sahoo R. R., Biswas S. K. Microtribology and friction-induced material transfer in layered MoS₂ nanoparticles sprayed on a steel surface. *Tribology Letters*. 2010;37: 313–326.
- [13] Shen B., Malshe A. P., Kalita P., Shih A. J., Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of Namri/SME*. 2008;36:357–364.
- [14] Hu K. H., Liu, M., Wang Q. J., Xu Y. F., Schraube S., Hu X.G. Tribological properties of molybdenum disulfide nanosheets by monolayer restacking process as additive in liquid paraffin. *Tribology International*. 2009;42:33–39.
- [15] Akincioğlu S., Şirin Ş. Evaluation of the tribological performance of the green hBN nanofluid on the friction characteristics of AISI 316L stainless steel. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2021; 73:(9).1176–1186.
- [16] Yücel A., Yıldırım Ç. V., Sarıkaya M., Şirin Ş., Kıvak T., Gupta M. K., Tomaz İ. V. Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; 15:1688–1704.
- [17] Shi, H., Fu, X., Zhou, X., Wang, D., Hu, Z. A low-temperature extraction–solvothel route to the fabrication of micro-sized MoS₂ spheres modified by Cyanex 301. *Journal of Solid State Chemistry*. 2006;179:(6)1690–1697.
- [18] Ünlüoğlu O, Çelik O.N. Grafit partiküllerinin yağ katkısı olarak AISI H11 çeliğinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerine etkisi. *Politeknik*. 2012;1: 1-1.
- [19] Kumar G.R, Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc

- tribometer. *Material Today Proceedings*, 2020;28:1216–1220.
- [20]Şirin Ş, Akıncıoğlu S, Gupta MK, Kıvak T, Khanna N. A tribological performance of vegetable-based oil combined with GNPs and hBN nanoparticles on the friction-wear tests of titanium grade 2. *Tribology International*. 2023; 181:108314.
- [21]Yıldırım ÇV, Şirin Ş, Kıvak T, Sarıkaya M. The effect of nanofluids reinforced with different surfactants on the machining and friction-wear properties of Waspaloy. *Tribology International*. 2023; 181:108316.
- [22]Şirin E, Kıvak T, Yıldırım Ç.V. Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X, *Tribology International*. 2021; 157: 106894.
- [23]Şirin Ş, Kıvak T. Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribology International*. 2019; 137: 180–192.
- [24]Yıldırım Ç.V, Sarıkaya M, Kıvak T, Şirin Ş. The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *Tribology International*. 2019; 134: 443–456.
- [25]Lee K, Hwang Y, Cheong S, Choi Y, Kwon L, Lee J, Kim S.H. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication, *Tribol Letters*. 2009; 35: 127–131.
- [26]Şirin Ş. AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliğin tornalanmasında MMY, hBN ve N2 soğutma/yağlama koşullarının performans değerlendirilmesi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 2022; 6: 103–110.
- [27]Alemani M, Gialanella S, Straffelini G, Ciudin R, Olofsson U, Perricone G, Metinoz I. Dry sliding of a low steel friction material against cast iron at different loads: Characterization of the friction layer and wear debris. *Wear*. 2017; 376 :1450–1459.
- [28]Sundh J, Olofsson U, Sundvall K. Seizure and wear rate testing of wheel–rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology. *Wear*. 2008; 265:1425–1430.
- [29]Çelik O.N, Ay N, Göncü Y., Effect of nano hexagonal boron nitride lubricant additives on the friction and wear properties of AISI 4140 steel. *Particulate Science and Technology*. 2013; 31: 501–506.
- [30]Wulpi D. J. (2013). *Understanding How Components Fail*. America: ASM International.
- [31]Chatha S.S, Pal A, Singh T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 137: 537-545.
- [32]Yi S, Li G, Ding S, Mo J. Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017; 29:182–93.
- [33]Sen B., Gupta M. K., Mia M., Mandal U. K., Mondal S. P. Wear behaviour of TiAlN coated solid carbide end-mill under alumina enriched minimum quantity palm oil-based lubricating condition. *Tribology International*. 2020; 148: 106310.

A new Intrusion Detection System for Secured IoT/IIoT Networks based on LGBM

İlhan Fırat KILINÇER¹  Oğuzhan KATAR^{2,*} 

¹Firat University, Department of Informatics, 23100, Merkez/ELAZIG

²Firat University, Faculty of Technology, Department of Software Engineering, 23100, Merkez/ELAZIG

Article Info:

Research article
Received: 09/09/2022
Revision: 01/12/2022
Accepted: 19/04/2023

Keywords

Internet of Things
LGBM
Cyber Security
Intrusion Detection

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/09/2022
Düzeltilme: 01/12/2022
Kabul: 19/04/2023

Anahtar Kelimeler

Nesnelerin İnterneti
LGBM
Siber Güvenlik
Saldırı Tespiti

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a multi-class classification method was applied using various datasets from ToN_IoT and the Light Gradient Boosting Machine (LGBM) classifier, showing that it is an effective method in preventing cyber attacks on IoT/IIoT networks.

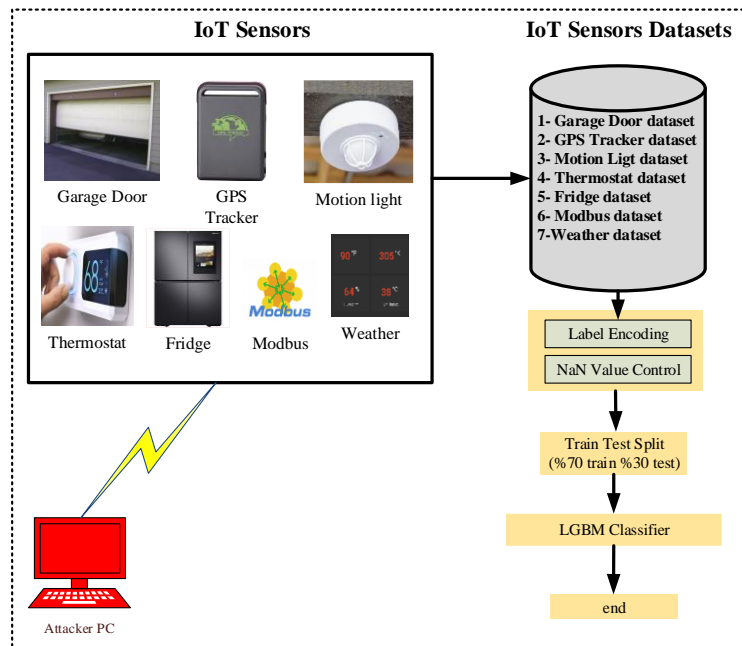


Figure A: Proposed method /Şekil A: Önerilen yöntem

Highlights (Önemli noktalar)

- The proposed method is effective in preventing cyber attacks on IoT/IIoT networks./Önerilen yöntem, IoT/IIoT ağlarına yönelik siber saldırıların önlenmesinde etkilidir.
- The proposed method provided the highest classification performance in the literature./Önerilen yöntem literatürdeki en yüksek sınıflandırma performansını sağlamıştır.
- The study uses multiple datasets related to IoT sensors from ToN_IoT, such as fridge, garage door, GPS tracker, modbus, motion light, weather, and thermostat./Çalışma, buzdolabı, garaj kapısı, GPS izleyici, modbus, hareketli ışık, hava durumu ve termostat gibi ToN_IoT'den IoT sensörleriyle ilgili birden çok veri kümesi kullanır.

Aim (Amaç): Automatic detection of cyber attacks against IoT networks./ IoT ağlarına yönelik siber saldırıların otomatik tespiti.

Originality (Özgünlük): This is the first study to employ multiple sensor datasets and the LGBM classifier./ Çoklu sensör veri setlerini ve LGBM sınıflandırıcısını kullanan ilk çalışmadır.

Results (Bulgular): The proposed method has achieved over 90% accuracy in detecting attacks./Önerilen yöntem, saldırıları tespit etmede %90'ın üzerinde doğruluk elde etmiştir.

Conclusion (Sonuç): The proposed method has shown promising results in automatic detection of cyber attacks against IoT/IIoT networks./ Önerilen yöntem, IoT / IIoT ağlarına yönelik siber saldırıların otomatik olarak tespit edilmesinde umut verici sonuçlar göstermiştir.



A new Intrusion Detection System for Secured IoT/IIoT Networks based on LGBM

İlhan Fırat KILINÇER¹ Oğuzhan KATAR^{2,*}

¹Firat University, Department of Informatics, 23100, Merkez/ELAZIG

²Firat University, Faculty of Technology, Department of Software Engineering, 23100, Merkez/ELAZIG

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/09/2022
Düzeltilme: 01/12/2022
Kabul: 19/04/2023

Keywords

Internet of Things
LGBM
Cyber Security
Intrusion Detection

Abstract

The Internet of Things (IoT) is one of the technologies used in many fields today. Cyber attacks against IoT/Industrial IoT (IIoT) networks, which are increasingly used thanks to the convenience it provides, are constantly increasing. Detection of attacks against IoT/IIoT networks is one of the popular topics recently. The development of a dataset for IoT applications is essential for the intrusion detection in IoT networks. In this context, the ToN_IoT dataset created in the laboratory of UNSW Canberra (Australia) is one of the most comprehensive datasets that can be used to detect cyber attacks on IoT networks. In this study, fridge, garage door, GPS tracker, modbus, motion light, weather, thermostat datasets related to IoT sensors from ToN_IoT datasets were used. The datasets used were subjected to multi-class classification with the Light Gradient Boosting Machine (LGBM) classifier proposed in the study. The obtained results were compared with the literature and it was seen that the proposed method provided the highest classification performance in the literature. It has been determined that the proposed method is effective in preventing cyber attacks on IoT/IIoT networks.

Güvenli IoT / IIoT Ağları İçin LGBM Tabanlı Yeni Bir Saldırı Tespit Sistemi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/09/2022
Düzeltilme: 01/12/2022
Kabul: 19/04/2023

Anahtar Kelimeler

Nesnelerin İnterneti
LGBM
Siber Güvenlik
Saldırı Tespiti

Öz

Nesnelerin İnterneti (IoT) günümüzde birçok alanda kullanılan teknolojilerden biridir. Sağladığı kolaylıklar sayesinde giderek daha fazla kullanılan IoT/Endüstriyel IoT (IIoT) ağlarına yönelik siber saldırılar sürekli artmaktadır. IoT / IIoT ağlarına yönelik saldırıların tespiti son zamanlarda popüler konulardan biridir. IoT uygulamaları için bir veri kümesinin geliştirilmesi, IoT ağlarında izinsiz giriş tespiti için gereklidir. Bu bağlamda UNSW Canberra (Avustralya) laboratuvarında oluşturulan ToN_IoT veri kümesi, IoT ağlarına yönelik siber saldırıları tespit etmek için kullanılabilecek en kapsamlı veri kümelerinden biridir. Bu çalışmada ToN_IoT veri setlerinden IoT sensörlerine ait buzdolabı, garaj kapısı, GPS takip cihazı, modbus, hareket ışığı, hava durumu, termostat veri setleri kullanılmıştır. Kullanılan veri kümeleri, çalışmada önerilen Light Gradyan Artırma Makinesi (LGBM) sınıflandırıcısı ile çok sınıflı sınıflandırmaya tabi tutuldu. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin literatürde en yüksek sınıflandırma performansını sağladığı görülmüştür. Önerilen yöntemin IoT/IIoT ağlarına yönelik siber saldırıların önlenmesinde etkili olduğu belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Internet of Things (IoT) is a developing technology that is used in many areas such as smart transportation, smart health services, smart home, smart city. The Internet of Medical Things (IoMT), which is the adaptation of IoT to the health sector, and the Industrial Internet of Things (IIoT), which is the adaptation to industrial areas, have created a great revolution. IoT networks, which are formed as

a result of connecting many smart devices such as sensors, actuators and smart modules, provide great convenience to users [1,2]. IoT networks and devices used in many areas such as SCADA systems, healthcare services, transportation services are vulnerable to cyber attacks [3].

Intrusion detection in IoT networks is one of the most important problems today. New methods based on artificial intelligence methods are being

developed both in the literature and in the industry for intrusion detection on IoT networks [4]. Alsaedi et al. [5], proposed the ToN_IoT dataset for intrusion detection in IoT and IIoT networks. Their proposed dataset includes telemetry data, system logs and network traffic in IoT and IIoT networks. In addition, they used machine learning and deep learning methods to measure the performance of the ToN_IoT dataset they proposed in their study. Essop et al. [6], produced a new IoT/IIoT dataset using the Cooja simulator. Zachos et al. [7], proposed the Anomaly-based Intrusion Detection Systems (AIDS) system to detect anomalies in IoMT networks. In their proposed method, they used machine learning methods to detect attacks in IoMT networks.

Increasing the performance of machine learning methods, which are frequently used in the intrusion detection on IoT networks, has become an important issue today. Weinger et al. [8], applied their proposed data augmentation method to DS2OS and ToN_IoT datasets for intrusion detection on IoT networks. Bui et al. [9], established a toolchain called Configuration, REproduction, Multi-dataset, and Evaluation (CREME) to increase the intrusion detection capabilities of IDS, and measured both a new dataset and the quality of the dataset they created. Haider et al. [10], proposed the Fuzzy Gaussian Mixture-based Correntropy-Host Anomaly Detection Systems (FGMC-HADS) method based on the Fuzzy Rough Attribute Reduction (FRAR) method and the Gaussian Mixture Model (GMM). They used NGIDS-DS, KDD-98 and ToN_IoT Linux datasets to measure the intrusion detection capability of the proposed method.

In this study, a Light Gradient Boosting Machine (LGBM) based system has been developed that detects cyber attacks on IoT networks with high accuracy. In addition, the ToN_IoT dataset, which comprehensively addresses attacks on today's IoT networks, was used in the study. Other parts of the research are presented as follows. In the second part of the study, the material and method related to the proposed method are discussed. In the third part of the study, the performances of the proposed method in all datasets are presented in a table. Performance analysis, conclusion and future studies are examined in section 4 and 5, respectively.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, an advanced intrusion detection system is proposed for the detection of attacks on

IoT networks. In summary, the proposed method consists of data preprocessing, training and test data separation and classification. The flow chart of the proposed method is given in Figure 1.

According to the flowchart given in Figure 1, the proposed method consists of the following steps.

1. The IoT sensor datasets taken from the ToN_IoT data sets were first standardized by label encoding and NaN value check. If the datasets have NaN values, the NaN values are replaced by the column averages.
2. After the datasets were set to a certain standard, the datasets were separated as 70% training and 30% test data.
3. At the last stage, the datasets were classified with the proposed LGBM classifier. If the desired accuracy rate is achieved as a result of the classification, the process is finished. After the label encoding step, the classes under the "type" label in each dataset were encoded as in Table 1.

The amount of data received for each attack scenario is also listed in Table 1. The data amounts of the attack scenarios in each dataset are visualized in Figure 2.

2.1. Dataset (Veri Seti)

In the study, the ToN_IoT dataset was used to reflect the attacks in a real IoT network. ToN_IoT datasets were collected from data of IoT/IIoT networks. The dataset is generated from operating systems logs and IoT network traffic. The datasets were obtained from a realistic UNSW Canberra IoT lab consisting of cloud layer, edge layer and fog layer. In the datasets obtained, there is the label "Label", which indicates whether a feature is normal or an attack, and the "type" label, which indicates the subclasses of the attacks. Scanning, DoS, DDoS, ransomware, backdoor, data injection, Cross-site Scripting (XSS), password cracking attack and Man-in-The-Middle (MITM) attacks were made under the "type" tag for multi-classification [5,11,12]. In this study, fridge, garage door, gps tracker, motion light, modbus, thermostat and weather datasets obtained from IoT sensor data were studied. Unnecessary "date" and "time" features were removed from all datasets.

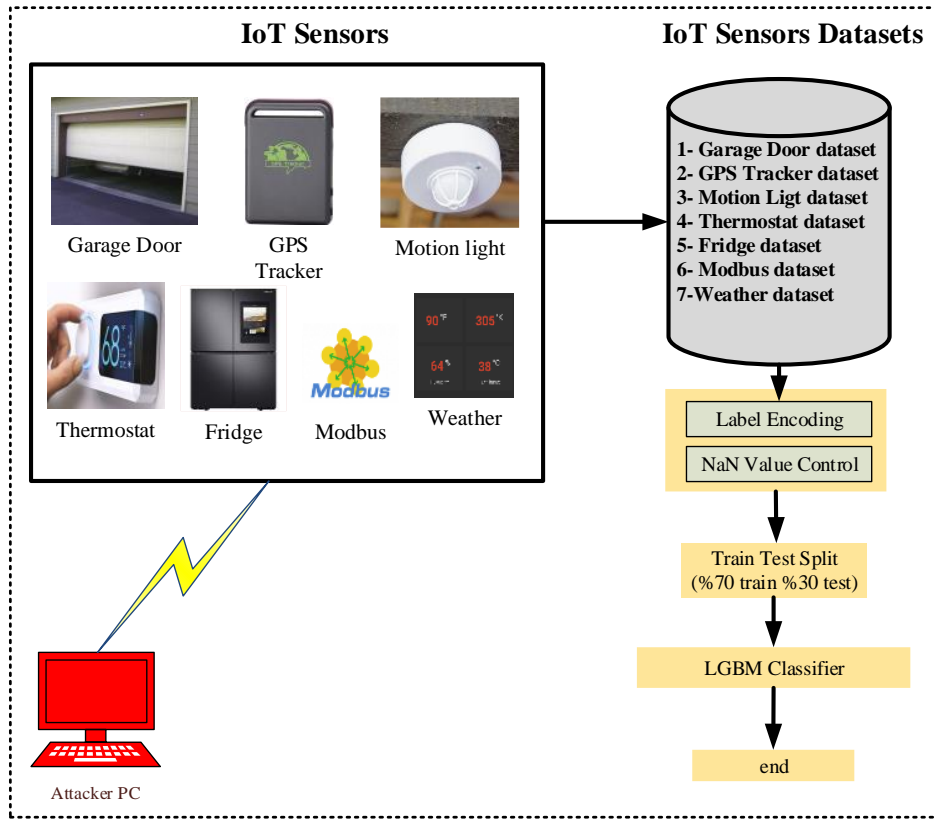


Figure 1. Proposed method flow diagram (Önerilen yöntem akış şeması)

Table 1. The encoded version of the classes in the "type" attribute in the datasets (Veri kümelerindeki "type" özelliğindeki sınıfların kodlanmış versiyonu)

Dataset	Type	Type Number After Label Encoding	Data Count
Fridge	backdoor	1	5000
	ddos	2	5000
	data injection	3	5000
	normal	4	35000
	password cracking	5	5000
	ransomware	6	2902
	xss	7	2042
Garage Door	backdoor	1	5000
	ddos	2	5000
	data injection	3	5000
	normal	4	35000
	password cracking	5	5000
	ransomware	6	2902
	scanning	7	529
GPS Tracker	backdoor	1	5000
	ddos	2	5000
	data injection	3	5000
	normal	4	35000
	password cracking	5	5000
	ransomware	6	2833
	scanning	7	550
Modbus	backdoor	1	5000
	data injection	2	5000
	normal	3	35000

	password cracking	4	5000
	scanning	5	577
	xss	6	529
Motion Light	backdoor	1	5000
	ddos	2	5000
	data injection	3	5000
	normal	4	35000
	password cracking	5	5000
	ransomware	6	2264
	scanning	7	1775
	xss	8	449
Thermostat	backdoor	1	5000
	data injection	2	5000
	normal	3	35000
	password cracking	4	5000
	ransomware	5	2264
	scanning	6	61
	xss	7	449
Weather	backdoor	1	5000
	ddos	2	5000
	data injection	3	5000
	normal	4	35000
	password cracking	5	5000
	ransomware	6	2865
	scanning	7	529
	xss	8	866

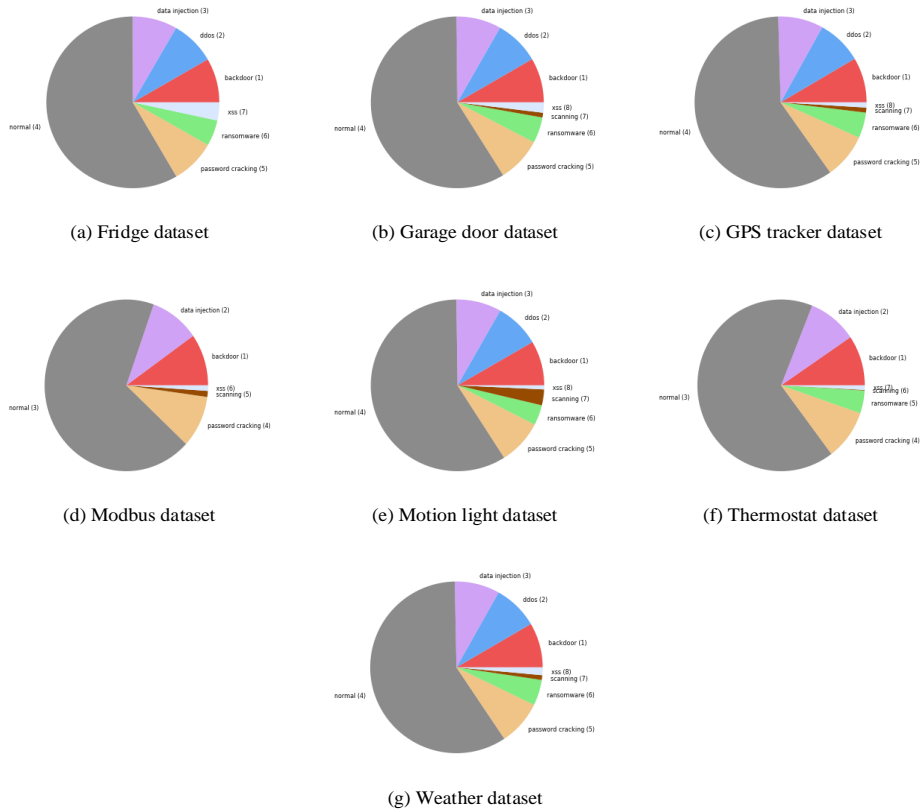


Figure 2. Class distributions in ToN_IoT datasets, a) Fridge dataset, b) Garage door dataset, c) GPS tracker dataset, d) Modbus dataset, e) Motion light dataset, f) Thermostat dataset, g) Weather dataset (ToN_IoT veri kümelerindeki sınıf dağılımları, , a) Fridge veri seti, b) Garage door veri seti, c) GPS tracker veri seti, d) Modbus veri seti, e) Motion light veri seti, f) Thermostat veri seti, g) Weather veri seti)

2.2. LGBM Classifier (LGBM Sınıflandırıcı)

The LGBM classifier, developed to improve the training time performance of the XGBoost algorithm, uses a leaf-wise tree growth strategy. The leaf-wise growth method used by LGBM is summarized in Figure 3 [13,14].

In the Leaf-wise growth strategy shown in Figure 3, the decision trees try to open the tree vertically as far as they can go, when the maximum depth is achieved, it starts to open the other branch vertically from the top. In this study, LGBM classifier was used for classification due to its high performance.

3. EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSEL BULGULAR)

In the study, sensor datasets from ToN_IoT datasets are discussed. Multi-class classification was made according to the "type" parameter in the considered datasets. The codes of the proposed method were written using the scikit-learn, matplotlib libraries in Python 3.7 environment. Accuracy, precision, recall, F-Score values were calculated for each

dataset in the study. Performance metrics calculated as equations 1, 2, 3 and 4 respectively [11,15]. The results obtained are given in Table 2.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F - Measure = \frac{2TP}{2TP+FP+FN} \quad (4)$$

Confusion matrices obtained for all datasets are given in Figure 4. The numbers in the matrices show the encoded classes in Table 1.

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

In this section, the performance of the proposed method in the study is compared with the existing studies in the literature. The comparative analysis made is given in Table 3. Only the Accuracy values are compared in the table.

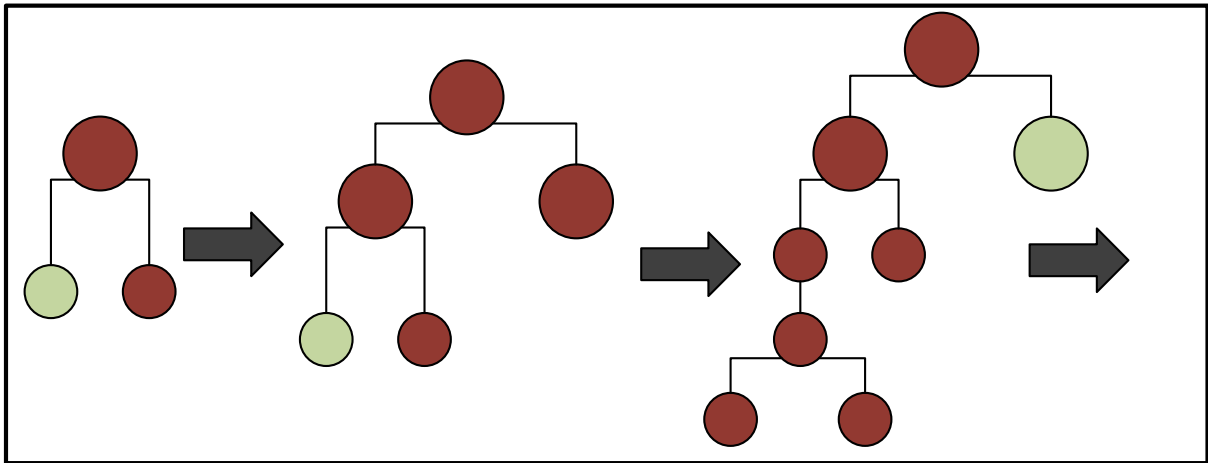


Figure 3. LGBM leaf-wise growth strategy (LGBM yaprak bazında büyüme stratejisi)

Table 2. Proposed method performance evaluation (%) (Önerilen yöntemin performans değerlendirmesi (%))

Datasets	Model	Accuracy	Precision	Recall	F-Score
Fridge	LGBM	99.68	100	100	100
Garage Door	LGBM	99.75	98	100	99
GPS Tracker	LGBM	99.977	100	100	100
Modbus	LGBM	100	100	100	100
Motion Light	LGBM	97.79	98	98	97
Weather	LGBM	99.971	100	100	100
Thermostat	LGBM	92.27	89	92	90

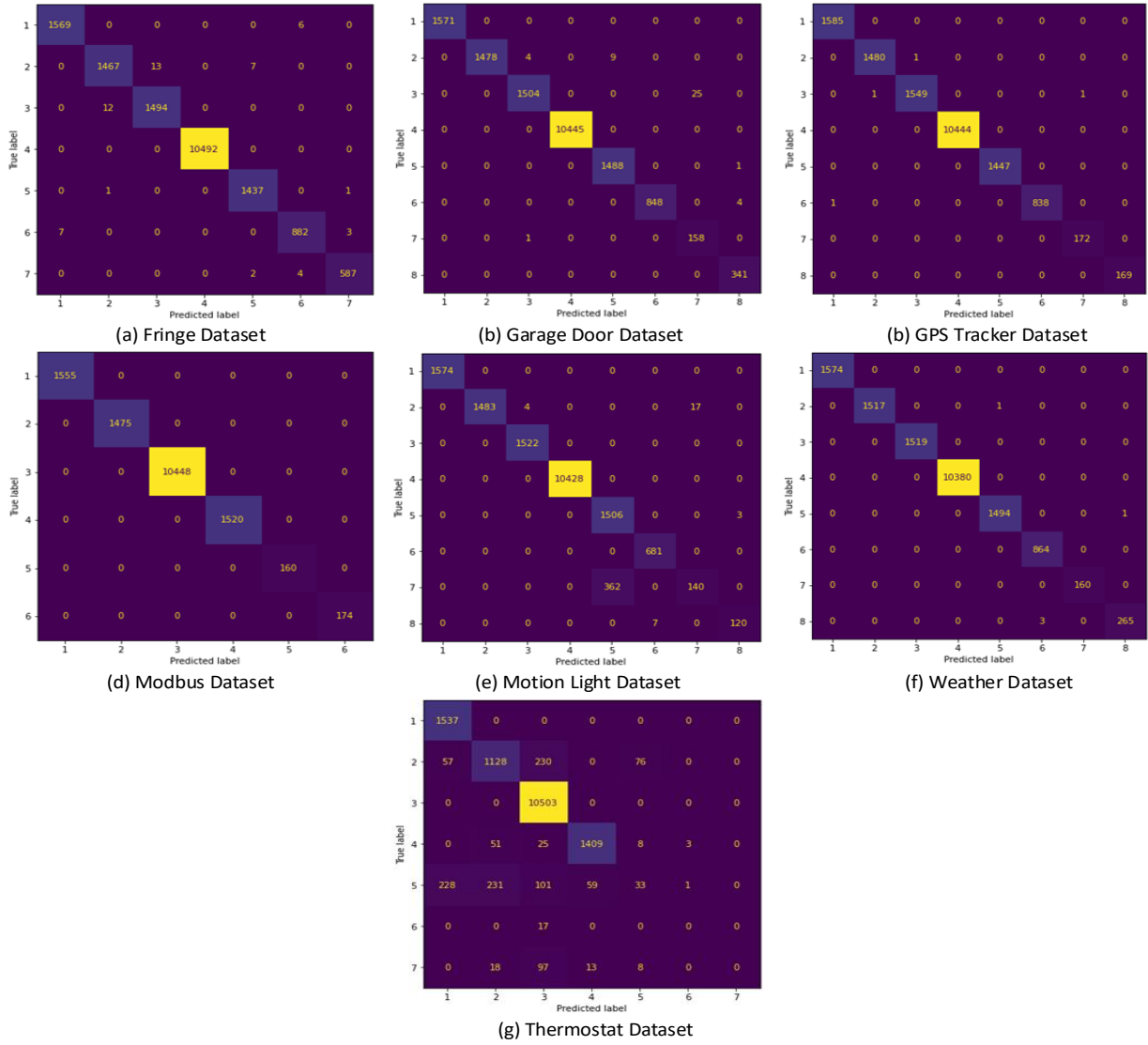


Figure 4. Confusion matrices for each results, a) Fridge dataset, b) Garage door dataset, c) GPS tracker dataset, d) Modbus dataset, e) Motion light dataset, f) Thermostat dataset, g) Weather dataset (Her sonuç için karışıklık matrisleri, a) Fridge veri seti, b) Garage door veri seti, c) GPS tracker veri seti, d) Modbus veri seti, e) Motion light veri seti, f) Thermostat veri seti, g) Weather veri seti)

Table 3. Proposed method and literature comparison (Önerilen yöntem ve literatür karşılaştırması)

References	Datasets	Model	Accuracy
[5]	Fridge	LSTM	100
	Garage Door	LSTM	100
	GPS Tracker	kNN	88
	Modbus	CART	98
	Motion Light	LSTM	59
	Weather	CART	87
	Thermostat	LSTM	66
Proposed Method	Fridge	LGBM	99.68
	Garage Door	LGBM	99.75
	GPS Tracker	LGBM	99.977
	Modbus	LGBM	100
	Motion Light	LGBM	97.79
	Weather	LGBM	99.971
	Thermostat	LGBM	92.27

The proposed method was applied to the “Train_Test_IoT_dataset” dataset, which is one of the ToN_IoT datasets. Since the number of studies with this dataset is limited in the literature, only one study could be compared. According to Table 2, the proposed method provided a performance similar to the literature in the fridge and garage door datasets with approximately 100% accuracy values. While an accuracy rate of 88% was obtained in the literature for the gps tracker dataset, the proposed method reached an accuracy of 99.977% for this dataset. While the values of 98%, 59%, 87% and 66% were obtained, respectively, in the literature for modbus, motion light, weather, and thermostat datasets, the proposed method reached 100%, 97.79%, 99.971% and 92.27% for these datasets, respectively. As a result, the proposed method provided high performance for all datasets.

5.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, a method has been proposed for the detection of cyber attacks on IoT/IIoT networks that we encounter in almost every field. The proposed method has been applied to the ToN_IoT dataset, which represents a realistic IoT/IIoT network. The datasets used include many attack vectors that are frequently encountered today, such as scanning, DoS, DDoS, ransomware, backdoor, data injection, XSS, password cracking attack and MITM. With the LGBM classifier suggested in the study, fridge, garage door, gps tracker, modbus, motion light, weather, thermostat datasets were classified according to the “type” parameter. Performance values of 99.68%, 99.75%, 99.97%, 100%, 97.79%, 99.97% and 92.27% were reached for the datasets, respectively. The proposed method has achieved very high performances in detecting attacks used in the specified datasets.

In future studies, it is planned to obtain a new IoT dataset using the Cooja simulator in the first stage. In the second stage, it is aimed to establish a new IoT laboratory and to create a new IDS dataset for IoT networks by applying various attack scenarios to this IoT laboratory to be established.

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)

İlhan Fırat KILINÇER: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

Oğuzhan KATAR: 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] Nandy S., Adhikari M., Khan M. A., Menon V. G., Verma S., An intrusion detection mechanism for secured IoMT framework based on swarm-neural network, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 26 (2021) 1969-1976.
- [2] Ahmad J., Shah S. A., Latif S., Ahmed F., Zou Z., Pitropakis N., DRaNN_PSO: A deep random neural network with particle swarm optimization for intrusion detection in the industrial internet of things, Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences,(2022).
- [3] Lu K. D., Zeng G. Q., Luo X., Weng J., Luo W., Wu Y., Evolutionary deep belief network for cyber-attack detection in industrial automation and control system, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17 (2021) 7618-7627.
- [4] Campos E. M., Saura P. F., González-Vidal A., Hernández-Ramos J. L., Bernabe J. B., Baldini G., Skarmeta A., Evaluating Federated Learning for intrusion detection in Internet of Things: Review and challenges, Computer Networks,(2021).
- [5] Alsaedi A., Moustafa N., Tari Z., Mahmood A., Anwar A., TON_IoT telemetry dataset: A new generation dataset of IoT and IIoT for data-driven intrusion detection systems, IEEE Access, 8 (2020) 165130-165150.

- [6] Essop I., Ribeiro J. C., Papaioannou M., Zachos G., Mantas G., Rodriguez J., Generating datasets for anomaly-based intrusion detection systems in iot and industrial iot networks, *Sensors*, 21 (2021) 1528. *Transactions on Intelligence Technology*, 6 (2021) 405-416.
- [7] Zachos G., Essop I., Mantas G., Porfyraakis K., Ribeiro J. C., Rodriguez J., An anomaly-based intrusion detection system for internet of medical things networks, *Electronics*, 10 (2021) 2562.
- [8] Weinger B., Kim J., Sim A., Nakashima M., Moustafa N., Wu K. J., Enhancing IoT anomaly detection performance for federated learning, *Digital Communications and Networks*,(2022).
- [9] Bui H. K., Lin Y. D., Hwang R. H., Lin P. C., Nguyen V. L., Lai Y. C., CREME: A toolchain of automatic dataset collection for machine learning in intrusion detection, *Journal of Network and Computer Applications*, 193 (2021) 103212.
- [10] Haider W., Moustafa N., Keshk M., Fernandez A., Choo K. K. R., Wahab A., FGMC-HADS: Fuzzy Gaussian mixture-based correntropy models for detecting zero-day attacks from linux systems, *Computers & Security*, 96 (2020) 101906.
- [11] Gad A. R., Nashat A. A., Barkat T. M., Intrusion detection system using machine learning for vehicular ad hoc networks based on on ToN-IoT dataset, *IEEE Access*, 9 (2021) 142206-142217.
- [12] Idrissi I., Azizi M., Moussaoui, O., Accelerating the update of a DL-based IDS for IoT using deep transfer learning, *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 23 (2021) 1059-1067.
- [13] Zhang Z., Zhang Y., Guo D., Song, M., A scalable network intrusion detection system towards detecting, discovering, and learning unknown attacks, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12 (2021) 1649-1665.
- [14] Al Daoud E., Comparison between XGBoost, LightGBM and CatBoost using a home credit dataset, *International Journal of Computer and Information Engineering*, 13 (2019) 6-10.
- [15] Mohindru G., Mondal K., Banka, H., Different hybrid machine intelligence techniques for handling IoT-based imbalanced data, *CAAI*

High Performance and Cycling Stability Supercapacitors Employing MnS@Polypyrrole Nanocomposites as Cathode Material

Mahir GÜLEN^{1*} 

¹Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Mechanical Engineering, 74100, Bartın, Turkey

Article Info:

Research article
Received: 07/01/2023
Revision: 22/02/2023
Accepted: 23/03/2023

Keywords

Energy storage
Supercapacitor
Nanocomposites
Renewable energy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/01/2023
Düzeltilme: 22/02/2023
Kabul: 23/03/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji depolama
Süperkapasitör
Nanokompozitler
Yenilenebilir enerji

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a nanocomposite is prepared to obtain supercapacitor with high specific capacitance and cycling stability. The nanocomposite is fabricated by the electropolymerization of PPy on MnS, following synthesis of MnS via rapid and simple microwave-assisted method / Bu çalışmada, yüksek özgül kapasitans ve çevrim kararlılığına sahip süperkapasitör elde etmek için bir nanokompozit hazırlanmıştır. Nanokompozit, MnS'nin hızlı ve basit mikrodalga destekli yöntemle sentezinin ardından PPy'nin MnS üzerine elektropolimerizasyonu ile üretilmiştir.

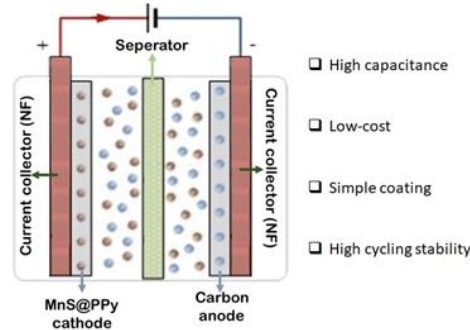


Figure A: Schematic diagram of prepared supercapacitor / Şekil A: Hazırlanan süperkapasitörün şematik diyagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- MnS@PPy nanocomposite/MnS@PPy nanokompozit
- High capacitance/Yüksek kapasitans
- High stability/Yüksek kararlılık

Aim (Amaç): In this research, to increase the electric conductivity, cycle life stability, electro-activity and capacitance of PPy, MnS have been incorporated into PPy matrix and resulting nanocomposite employed as cathode material in supercapacitors / Bu çalışmada, PPy'nin elektrik iletkenliğini, çevrim ömrü kararlılığını, elektro-aktivitesini ve kapasitansını artırmak için MnS, PPy matrisine dahil edilmiş ve elde edilen nanokompozit, süperkapasitörlerde katot malzemesi olarak kullanılmıştır.

Originality (Özgünlük): MnS was synthesized using microwave assisted method and incorporated into PPy matrix for the first time to prepare MnS@PPy nanocomposite with high cycling stability and electrocatalytic activity / MnS, mikrodalga destekli yöntem kullanılarak sentezlenmiş ve ilk kez yüksek çevrim kararlılığı ve elektrokatalitik aktiviteye sahip MnS@PPy nanokompozit hazırlamak için PPy matrisine dahil edilmiştir.

Results (Bulgular): By incorporation of MnS into PPy matrix, the electrochemical and stability of PPy are improved. These improvements can be attributed to i) the increase in conductivity of nanocomposite stem from the synergistic effect between MnS and PPy, ii) the enlargement of the active surface area, iii) the increase in the ion diffusion rate, iv) the improvement of charge transfer kinetics and v) the increase in stability against volume change / MnS'nin PPy matrisine dahil edilmesiyle PPy'nin elektrokimyasal ve kararlılığı iyileştirilir. Bu iyileştirmeler; i) MnS ve PPy arasındaki sinerjistik etkiden nanokompozit gövdenin iletkenliğindeki artışa, ii) aktif yüzey alanının genişlemesine, iii) iyon difüzyon hızındaki artışa, iv) yük transfer kinetiğinin iyileştirilmesine ve v) hacim değişikliğine karşı stabilitenin artışına atfedilebilir.

Conclusion (Sonuç): The MnS@PPy electrode exhibited a capacitance about 5.6 times higher than bare PPy as well as a higher cycling stability. In the light of the obtained results, it can be said that the MnS@PPy structured nanocomposite is a promising candidate for commercialization of SC applications / MnS@PPy elektrodu, saf PPy'den yaklaşık 5,6 kat daha yüksek bir kapasitans ve ayrıca daha yüksek bir çevrim kararlılığı sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, MnS@PPy yapılı nanokompozitin SC uygulamalarının ticarileştirilmesi için umut vadeden bir aday olduğu söylenebilir.



High Performance and Cycling Stability Supercapacitors Employing MnS@Polypyrrole Nanocomposites as Cathode Material

Mahir GÜLEN^{1*}

¹Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Mechanical Engineering, 74100, Bartın, Turkey

Article Info

Research article
Received: 07/01/2023
Revision: 22/02/2023
Accepted: 23/03/2023

Keywords

Energy storage
Supercapacitor
Nanocomposites
Renewable energy

Abstract

In this study, MnS metal sulphide was incorporated into polypyrrole (PPy) matrix, and the fabricated nanocomposites were used for the first time as active electrode in supercapacitor (SC) architecture. MnS was obtained in a short time (15 min) via simple microwave technique, and the nanocomposite was synthesised successfully with electropolymerization of PPy in presence of MnS on nickel foam. Incorporation of MnS changed the growth mechanism of PPy, leading to increase in surface area, electrocatalytic activity and conductivity of the resulted nanocomposites. More importantly, MnS@PPy electrode exhibited a specific capacitance (C_s) of 1102 F/g which is approximately 5.6 times higher than that of the bare PPy (197 F/g). Furthermore, energy density (E_d) of the bare PPy was determined as 4.37 W/kg, by incorporation of MnS into PPy matrix the E_d value increased to 24.5 W/kg. On the other hand, after 1000 charge/discharge cycles, the cycle stability of the bare PPy remained at 72%, while MnS@PPy nanocomposite electrode is 95 %. The reasons for these improvements can be listed as; i) the increase in conductivity of nanocomposite stem from the synergistic effect between MnS and PPy, ii) the enlargement of the active surface area, iii) the increase in the ion diffusion rate, iv) the improvement of charge transfer kinetics and v) the increase in stability against volume change. In the light of the results obtained from this study, it can be said that the MnS@PPy structured nanocomposite is a promising candidate for commercialization of SC applications.

Katot Malzemesi olarak MnS@Polipirol Nanokompozitleri İçeren Yüksek Performans ve Döngü Kararlılığına Sahip Süper Kapasitörler

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/01/2023
Düzeltilme: 22/02/2023
Kabul: 23/03/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji depolama
Süperkapasitör
Nanokompozitler
Yenilenebilir enerji

Öz

Bu çalışmada MnS metal sülfür, polipirol (PPy) matrisine eklenmiş ve elde edilen nanokompozitler ilk kez süper kapasitör (SC) mimarisinde aktif katot olarak kullanılmıştır. MnS, basit mikrodalga tekniği ile kısa sürede (15 dakika) sentezlenmiş ve polipirol (PPy) de elektropolimerizasyon yöntemi ile MnS varlığında nikel köpük üzerine kaplanarak nanokompozitler başarıyla hazırlanmıştır. MnS'nin yapıya dahil edilmesi, PPy'nin büyüme mekanizmasını değiştirerek, elde edilen nanokompozitlerin yüzey alanında, elektrokatalitik aktivitesinde ve iletkenliğinde artışa yol açmıştır. Daha da önemlisi, MnS@PPy elektrodu, saf PPy'den (197 F/g) yaklaşık 5,6 kat daha yüksek olan 1102 F/g'lik bir spesifik kapasitans (C_s) sergilemiştir. Ayrıca saf PPy'nin enerji yoğunluğu (E_d) 4,37 W/kg olarak belirlenmiş, MnS'nin PPy matrisine katılmasıyla E_d değeri 24,5 W/kg'a yükselmiştir. Öte yandan, 1000 şarj/deşarj döngüsünden sonra saf PPy'nin döngü kararlılığı %72'de kalırken, MnS@PPy nanokompozit elektrot için %95'tir. Bu iyileştirmelerin nedenleri; i) MnS ve PPy arasındaki sinerjistik etkiden nanokompozit gövdenin iletkenliğindeki artış, ii) aktif yüzey alanının genişlemesi, iii) iyon difüzyon hızındaki artış, iv) yük transfer kinetiğinin iyileştirilmesi ve v) hacim değişikliğine karşı kararlılık sergilenmesi olarak sıralanabilir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında, MnS@PPy yapıları nanokompozitin SC uygulamalarının ticarileştirilmesi için umut verici bir aday olduğu söylenebilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The rapid development of portable technology and the industrial revolution are rapidly increasing energy demands. The required energy is mainly obtained from fossil fuels, which have a much

higher consumption rate. However, fossil fuels consist of carbon that accumulates and causes environmental pollution as well as global warming. Also, other renewable energy sources such as solar, hydro and wind power are unstable and weather dependent. Therefore, dramatic climate

fluctuations, depletion of fossil fuels, environmental impacts and increasing energy demands force researchers to develop energy storage systems.

Electrochemical capacitor as an energy storage is gaining momentum with the growing demand for portable systems and hybrid electric vehicles that require instantaneous high-power density. Compared to secondary batteries, electrochemical capacitors, also known as supercapacitors (SCs), demonstrate higher power density, long life, wide thermal operating range and low maintenance cost [1]. SCs have two energy storage mechanisms: electrochemical double-layer capacitance (EDLCS) and pseudocapacitance. Since electrochemical processes occur both at the surface and in bulk near the surface of the solid electrode, pseudocapacitors exhibit much greater capacitance and energy density than EDLCSs [2]. However, because of redox reactions occur at the electrode, electrodes that exhibit pseudocapacity are prone to swelling and shrinkage during the charge/discharge process, which can lead to poor mechanical stability and insufficient cycle stability. Therefore, the applicability of the pseudocapacity based supercapacitor is strongly dependent on the electrode material. An ideal electrode should have long cycle stability, large active surface area, a uniformly spaced morphology, high electrical conductivity, and rapid ion diffusion [3]. Generally, three types of electrode materials are studied in SCs: i) carbon-based materials, ii) metal oxides/sulphides and iii) conducting polymers [4]. Among these, conducting polymers have been attracted as electrode materials due to their electrochemical behaviours of fast reversible doping and de-doping ability, leading to storing the charges throughout the whole volume [5]. Mostly, because of high conductivity, simple processibility and high chemical stability, polypyrrole (PPy), polyaniline (PANI) and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) have been used for fabrication of electrodes employing in SCs. Especially, PPy is as an intrinsically conducting polymer has drawn more attention due to its great conductivity, high storage ability, high thermal and environmental durability, excellent redox ability [6]. However, as most conducting polymers, the PPy has a poorer long-term cycle stabilities than metal oxide, carbonaceous and metal sulphides since the redox spots in the polymer backbone are insufficiently stable and the backbone of polymer can be cracked after a few charge/discharge cycles.

Recently, to solve the cycling stability problem and improve capacitance of PPy based SCs, nanocomposite-based electrodes have been

designed by combining PPy with other materials such as metal oxides and metal sulphides [6–10]. Metal oxides are promising candidates for use as electrode materials in supercapacitors due to their high theoretical specific capacitance, low cost, and low toxicity. However, due to the low electrical conductivity of these materials (10^{-5} - 10^{-6} S/cm), the specific capacitance values are subject to a high deviation from their theoretical values [11]. Compared to these commonly used electrode materials, metal sulphides are abundant and inexpensive due to the presence of minerals in nature. More importantly, unlike metal oxides, metal sulphides generally exhibit higher electrical conductivity, flexibility, ionic diffusion, and anionic polarization due to the more covalent characteristics of the hard base O^{2-} ion being replaced by the soft base S^{2-}/S_2^{2-} ion [11–14]. In this regard, metal sulphides not only enhance the electronic properties but also improve the stability of PPy against to swelling and shrinking during the cyclic processes. For example, Peng et al., after synthesizing CuS (copper sulfide) by solvothermal method, obtained CuS/PPy composites at different ratios by in situ polymerization and used them as electrodes in supercapacitor [15]. In the study, the specific capacitance values at 1 A/g current density were recorded as 275, 212 and 427 F/g for pure PPy, CuS and CuS/PPy, respectively. After 1000 cycles, the initial capacity of PPy, CuS and CuS/PPy electrodes based SCs retained as 56%, 81% and 88%, respectively. In another study, Huo et al. synthesized the Co_3S_4 nanorod structure by hydrothermal method and obtained Co_3S_4 /PPy nanocomposite using in situ polymerization and applied it as an electrode in SC [16]. In the study, the R_{ct} values of Co_3S_4 and Co_3S_4 /PPy were determined as 0.78 and 0.48 Ω , respectively, indicating that Co_3S_4 increases ion diffusion and electrical conductivity of resulted composite. Also, because of the synergistic effect between Co_3S_4 and PPy, the specific capacitance of Co_3S_4 /PPy retained 98% of its initial capacitance value after 1000 cycles at current density of 8 A/g. In another study, Yan et al. prepared PPy/MoS₂/CC structured composite by synthesing MoS₂ nanosheets via hydrothermal method on carbon cloth (CC) then electrodeposition of PPy on MoS₂ nanosheets [17]. Electrochemical results reveal that the areal capacitance values of MoS₂/CC, PPy/CC and PPy/MoS₂/CC were 112.05, 648.49 and 1150.4 mF/cm², respectively. On the other hand, after 5000 times of charging/discharging cycles, the capacitance retention of MoS₂/CC, PPy/CC and PPy/MoS₂/CC electrodes were 71.5%, 58.3% and 87.2% respectively.

Herein, MnS rectangular prisms were synthesised via microwave-assisted method and coated on Ni foam (NF) by drop casting then MnS@PPy nanocomposite was prepared via electrodeposition of PPy on MnS rectangular prisms. Unlike to hydrothermal and solvothermal method, the MnS rectangular prisms have been synthesised in a very short time (2 h) via microwave-assisted method. Furthermore, electrodeposition of PPy directly on MnS@Ni foam remedied the need for any conductive additives (carbon allotropes etc.) and insulating binders, which reduces the internal resistance and provides faster charge transfer and high adhesion between the active material and the NF. In this research, to increase the electric conductivity, cycle life stability, electroactivity and capacitance of PPy, MnS for the first time have been incorporated into PPy matrix and resulting nanocomposite employed as cathode material for SCs. Electrochemical results reveal that MnS@PPy electrode exhibited a specific capacitance (C_s) of 1102 F/g which is approximately 5.6 times higher than that of the bare PPy (197 F/g). Furthermore, energy density (E_d) of the bare PPy was determined as 4.37 W/kg, by incorporation of MnS into PPy matrix the E_d value increased to 24.5 W/kg. On the other hand, after 1000 charge/discharge cycles, the cycle stability of the bare PPy remained at 72%, while MnS@PPy nanocomposite electrode is 95 %.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Experimental Equipment (Deneysel Ekipman)

To synthesis MnS was used Milestone/FlexiWave Advanced Flexible Microwave Synthesis Platform. To define the phase type and crystalline structure, X-ray diffraction (XRD) patterns of MnS metal sulphide were investigating employing RIGAKU SmartLab. Surface morphology of the samples were investigated using TESCAN MAIA3 XMU scanning electron microscopy (SEM) instrument. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy measurements of MnS, bare PPy and MnS@PPy were performed using the ATR method of Shimadzu spectrometer over a range from 400 to 4000 cm^{-1} . Thermal gravimetric analysis (TGA) was performed to examine the thermal properties of the samples. CV curves of samples were recorded using same set up for electrodeposition. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and galvanic charge/discharge (GCD) cycles of bare PPy and MnS@PPy based SCs were recorded employing WonATech ZIVE SP1 potentiostat-galvanostat system with two electrodes.

2.2. Synthesis of MnS and MnS@PPy

Nanocomposite (MnS ve MnS@PPy Nanokompozitinin Sentezlenmesi)

12 mM of Manganese (II) acetate tetrahydrate was prepared in de-ionize (DI) water and stirred for 30 min. Next, 0.1 M polyvinylpyrrolidone (PVP, PVP10, MW ~ 10000) and 0.2 M Na_2S solution were prepared in DI water and subjected to magnetic stirrer for 45 min. Prepared two solutions were mixed and stirred for 2 min. Afterwards, the solution was subjected to 900-Watt microwave irradiation at 150 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h and then cooled naturally to room temperature. The sample was then washed several times with DI water and ethanol, and the sample was finally dried at 60 $^{\circ}\text{C}$ overnight. Prior to deposition, to remove contamination from the surface of NF substrates (2x1 cm^2), they were cleaned using ultrasonic bath in 3 M HCl solution, acetone, and DI water respectively for 5 min. After that, the NF substrates were dried with N_2 gas flow and following at 60 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h in an oven. To deposit MnS on NF substrate, 5 mg/mL of MnS was dispersed in a mixture of DI water and isopropoxide (3:1) via ultrasonication process (TEFIC TF-650 ultrasonication instrument). Afterwards, MnS solution was dropped on NF and following drying process on a heater at 60 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min. This process was repeated 3 times and the obtained MnS/NF samples were finally dried at 60 $^{\circ}\text{C}$ overnight.

On the other hand, a potentiostat-galvanostat with standard three-electrode configuration was used for electrodeposition of PPy on surface of MnS@NF. The electrolyte solution for deposition of PPy was prepared by dissolving of 0.1 M pyrrole monomer and 0.1 M LiClO_4 in DI water. Next, the PPy was directly electrodeposited via potentiostat-galvanostat system included Pt sheet, Ag/AgCl and MnS@NF as counter, reference and working electrodes, respectively on MnS@NF samples by cyclic voltammetry method in range of -0.2-1.1V. In addition, PPy was deposited on NF samples as control cathode with same potentiostat-galvanostat set up. Finally, the obtained samples were cleaned with DI water several times and dried at 60 $^{\circ}\text{C}$ overnight. To determine the amount of loaded cathode active materials, NF substrates were weighted via precision balance instrument before and after deposition of active materials. Finally, asymmetric SC (ASC) devices were manufactured in NF/MnS (or without)/PPy/Polypropylene separator/super carbon/NF structure, with 2 M KOH electrolyte (in DI water).

3. RESULTS (BULGULAR)

In Phase purity and crystallinity of MnS powder was analysed by X-ray diffraction (XRD). As seen in Figure. 1a, the diffraction patterns located at $2\theta = 29.7^{\circ}$, 34.4° , 49.4° , 58.7° ve 61.6° angles can be indexed to the (111), (200), (220), (311) and (222) orientations, respectively [18]. All the diffraction patterns agree well with the reported data of cubic phase of α -MnS crystals (JCPDS#88-2223) and no significant impurity peaks were observed [19]. Furthermore, one can see from the sharp and well-defined diffraction peaks, MnS metal sulphide which was synthesized using microwave assisted method presents a good crystallinity. The vibrational properties of MnS, PPy and MnS@PPy were investigated by FTIR spectra as shown in Figure 1b. The peak located at 1235 and 1008 cm^{-1} in the MnS spectrum can be assigned to the formation of complex sulphur with the active sites in MnS. The peak at 610 cm^{-1} is ascribed to the Mn-S stretching vibration, indicating that MnS is successfully synthesised with microwave assisted method [9,20]. Moreover, in the spectrum of PPy, the peaks appeared at 1540 and 1453 cm^{-1} stem from the C-C and C-N stretching vibration of the pyrrole ring. The bands located at 1285 , 1170 and 1030 cm^{-1} are assigned to the C=N bending, C-N stretching and =C-H in-plane vibrations of PPy rings, respectively [21]. The peak at 678 cm^{-1} is related with C-H deformational vibration-mode of the PPy. In case of MnS@PPy nanocomposite, all the characteristic peaks of PPy can be seen in the spectrum. In addition, a new peak appeared approximately at 600 cm^{-1} , exhibiting that MnS is incorporated into PPy matrix. Furthermore, the bands seen at 1540 , 1453 , 1285 , 1030 and 678 cm^{-1}

in the spectrum of bare PPy are observed at slightly lower wavenumbers in the spectrum of MnS@PPy nanocomposite at 1521 , 1436 , 1280 , 1022 and 673 cm^{-1} , respectively. The observed shifting in characteristic bands of PPy with incorporation of MnS exhibits the electronic/synergistic interaction working at molecular degrees [21–23]. So, it can be said that MnS@PPy nanocomposite is successfully prepared by electro-polymerization of pyrrole on MnS/NF.

To assess the effects of MnS on thermal properties of PPy, TGA measurements were conducted and the obtained TGA curves are exhibited in Figure 1c. The standard thermograms for bare PPy, MnS and MnS@PPy nanocomposite show a three-step weight loss process as depicted in Figure 1c. The first step weight loss occurred between 28 - $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ stem from the evaporative loss of water and other volatile impurities [24]. The second step weight loss aroused between 180 - $385\text{ }^{\circ}\text{C}$ in bare PPy and MnS@PPy due to gradual thermal decomposition of the polymer chains [25]. The second step weight loss occurred for MnS between 180 - $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ due to the decomposition of sulphur in MnS structure. The third weight loss taken place between 385 - $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be attributed to pyrolysis of the materials. As deduced from TGA plots, bare PPy exhibited around 30.8% weight loss at $385\text{ }^{\circ}\text{C}$ which reduced to 24.5% for MnS@PPy. The reducing in weight loss of nanocomposite indicated that the thermal stability of PPy was significantly improved due to the intervening MnS in the polymer chains [26]. This caused in prolonged degradation of PPy chains, resulting in the increased thermal stability of the nanocomposite.

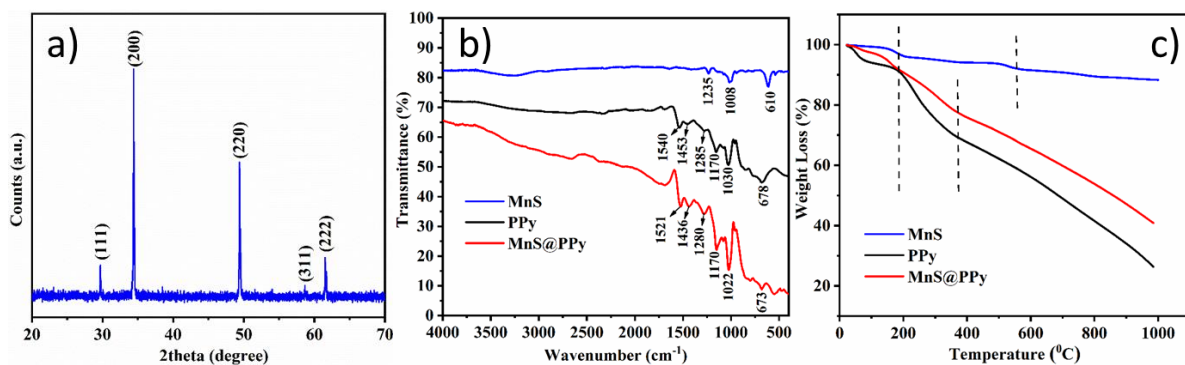


Figure 1. (a) XRD pattern of MnS, (b) FTIR spectra and (c) TGA curves of MnS, PPy and MnS@PPy nanocomposite ((a) *MnS'nin XRD kırınımları*, *MnS*, *PPy* ve *MnS@PPy* nanokompozitinin (b) *FTIR spektrumları* ve (c) *TGA eğrileri*)

Figure 2 exhibits the EDS and EDS mapping of MnS metal sulphide, top view SEM micrographs of MnS, bare PPy and MnS@PPy nanocomposite. As shown in Figure 2a, atomic percentage of

manganese and sulphur elements is 49.2 and 50.8% , respectively. In ideal case, the atomic percentage of Mn and S could be equal, the ratio of Mn/S is 0.97 which is very close to ideal number. Furthermore,

EDS mapping reveal that Mn and S elements homogenously distributed in MnS. EDS results are in good agreement with XRD patterns which are confirming that MnS successfully are synthesised using microwave assisted method in 2 h. As seen in Fig. 2c, the morphology of MnS metal sulphide consists of 500 nm wide cubes and 200 μm long rectangle prisms. In addition, it is seen that there is no formation other than cubic and prismatic structures. As shown in Figure 2d, the morphology of the PPy polymer consists of spherical grains with dimensions of about 400 nm. Moreover, it is observed that the spherical structures are interconnected and densely packed. Figure 2e dedicates that MnS@PPy nanocomposite firmly adhered to NF substrate without insulating adhesive. When Figure 2f is examined, the morphology of the nanocomposite structure consists of both cubic and prismatic MnS structures and spherical grains of PPy polymer. Therefore, it can

be said that the MnS@PPy nanocomposite was successfully synthesized using electrochemical polymerization method. Furthermore, incorporation of MnS changed the growth dynamics of PPy, leading that formation of PPy as nano sheets on MnS structures. This indicates that the active surface area of the resulted nanocomposite structure has increased significantly and PPy bounded with MnS rectangular prisms strongly. The enlargement of the surface area provides many advantages for the SC. First, it provides adequate surface contact between the electrode and electrolytes and accelerates the Faraday reactions as well as increases the reaction rate [27]. Second, it makes a large amount of electrolyte accessible for faster mass transfer [28]. Third, increasing the specific surface area promotes high mechanical flexibility, thereby reducing pulverization of electroactive materials during difficult cycle performance [29].

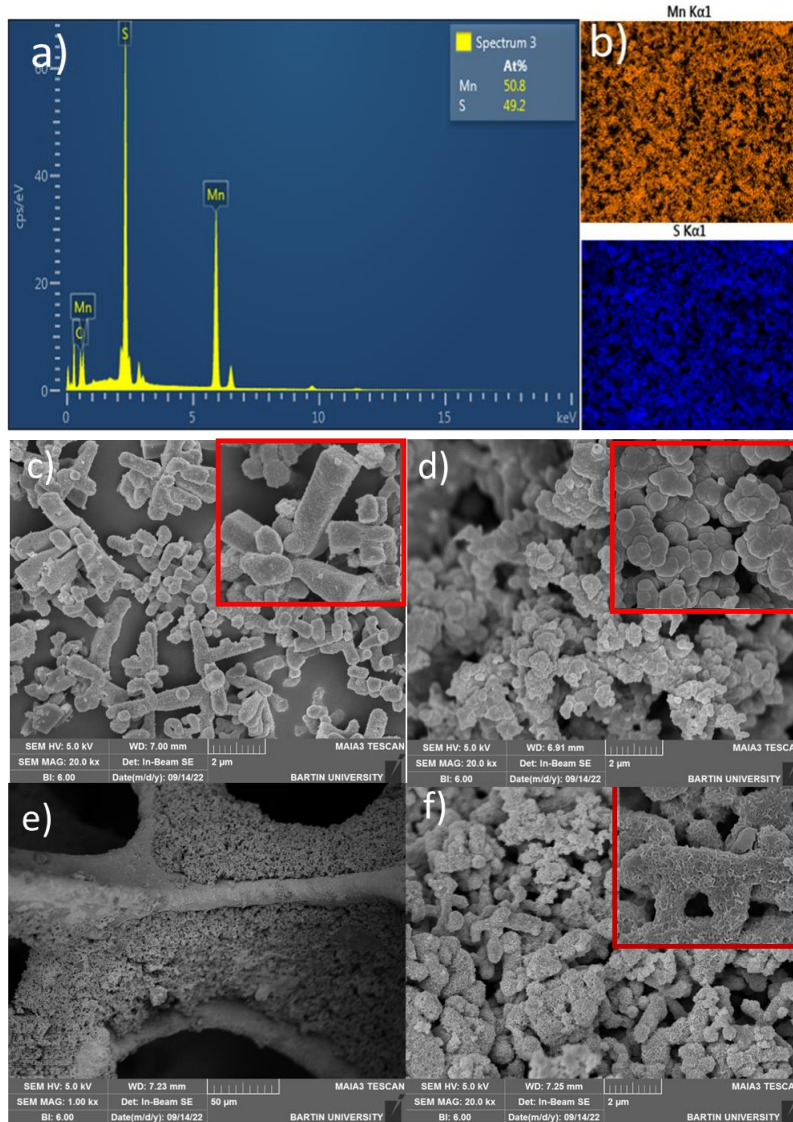


Figure 2. (a) EDS and (b) EDS mapping of MnS, SEM micrographs of (c) MnS, (d) bare PPy, (e) and (f) MnS@PPy nanocomposite with low and high magnifications, respectively (*MnS'nin (a) EDS ve (b) EDS haritalaması, (c) MnS, (d) saf PPy ve (f) MnS@PPy nanokompozitinin sırasıyla düşük ve yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri*)

The electrochemical behaviour of PPy and MnS@PPy nanocomposite was investigated in a 2M KOH aqueous electrolyte with a two-electrode potentiostat-galvanostat system. Cyclic voltammetry (CV), galvanic charge/discharge cycles (GCD), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and cycle stability measurements were performed for each electrode. CV measurements were carried out between 0 and 0.5 V at a scanning rate of 20 mV/s, GCD curves were recorded at different current densities (1A/g, 2A/g, 3A/g, 4A/g and 5 A/g) between 0 and 0.4 V, EIS curves were performed between 100 kHz-0.01 Hz and cycle stabilities of bare PPy and MnS@PPy electrode based SCs were taken as 1000 cycles at a current density of 2A/g. Figure 3 shows the electrochemical performances of SCs fabricated with bare PPy and MnS@PPy nanocomposite. Clearly, a double redox peak is observed in all CV curves over the 0-0.4 V voltage window, indicating pseudocapacitive properties [30]. When Figure 3a is examined, the oxidation and reduction peak current densities of the PPy were 25 and 17 mA/cm², while by introduction of MnS into the PPy polymer matrix, the peak current densities reached to 121 and 107 mA/cm², respectively. Moreover, the redox peak positions changed, and the peak-to-peak distance increased significantly compared to PPy. This indicates that MnS dramatically increases the electron transfer rate and speed [31]. Moreover, it indicates that the nanocomposite electrode will show a larger capacitance and lower internal resistance than the bare polymer [32]. Also, compared to PPy, MnS@PPy shows larger CV integrated areas, indicating higher electrochemical capacitance. The remarkable increase in the electrochemical properties of the MnS@PPy nanocomposite compared to the bare PPy is due to the increase in the electrical conductivity of the resulted nanocomposite by acting as a bridge between the PPy chains of the MnS rectangular prisms and the enlargement of the specific surface area by differentiating the surface morphology [33]. Figure 3b-c show the GCD curves of the PPy and MnS@PPy electrodes at different current densities, respectively. During fast charging and discharging, the internal resistance in the discharge curves shows a negligible internal resistance due to diffusion of electrolyte ions. When the current densities are increased, the shape and size of the charge-discharge curve remain the same, indicating stable behaviour of the electrode. The specific capacitance (C_{sp}) of the electrode from the charge-discharge curves was calculated with the following equation.

$$C_{sp} = (I \Delta t) / (m \Delta V)$$

Here, “I, Δt , m and ΔV represents the discharge current, the discharge time, the weight of the material coated on the NF substrates and potential window, respectively. Furthermore, energy density (E_d) and power density (P_d) of the electrodes were determined according to the following equations.

$$E_d = \frac{1}{2} C_{sp} V^2 \quad \text{and} \quad P_d = \frac{1}{2} C_{sp} V \cdot s$$

The determined C_{sp} values decrease with increasing scanning rate. This is because charge and discharge processes occur very quickly at higher scanning rates. Therefore, ions cannot penetrate deep into the electrode, resulting in low specific capacitance. From the GCD curves, the C_{sp} values of the PPy and MnS@PPy electrodes at 1 A/g current density were obtained as 197 and 1102 F/g, respectively. The C_{sp} value was increased approximately 5.6 times with incorporation of MnS into PPy. In addition, the energy (E_d) and power densities (P_d) of PPy and MnS@PPy were determined as 4.37 and 24.5 W/kg and 199.5 and 200 Wh/kg, respectively. These enhancements can be attributed to the increase of the electron transfer rate and speed, as well as the expansion of the surface area. Moreover, it is clear from these results that the specific capacitance of MnS@PPy nanocomposite compared to PPy shows excellent storage capacity even at higher current densities.

As shown in Figure 3d, EIS analyses were performed to further investigate the electrochemical performance of the electrodes. Nyquist plots of all electrodes show a single semicircle in the high frequency domain and a curved line in the low frequency domain. The diameter of the semicircle represents the charge transfer resistance (R_{ct}), which can reflect the permeability of the electrolyte. The linear parts correspond to the Warburg impedance (W), which can represent the ion diffusion resistance. Also, the value at which the curve crosses the x-axis represents the equivalent series resistance (R_s), which includes the internal resistance, the contact resistance of the interface (electrolyte/electrode), and the ionic resistance of the electrolyte [34]. When Figure 3d is examined, it is observed that PPy has higher R_{ct} , R_s and W values compared to MnS@PPy nanocomposite. This shows that the MnS@PPy nanocomposite has excellent electron transfer kinetics, low energy loss, and higher diffusion of the electrolyte on the electrode surface compared to the pure polymer. EIS analysis results support each other with CV and GCD measurements.

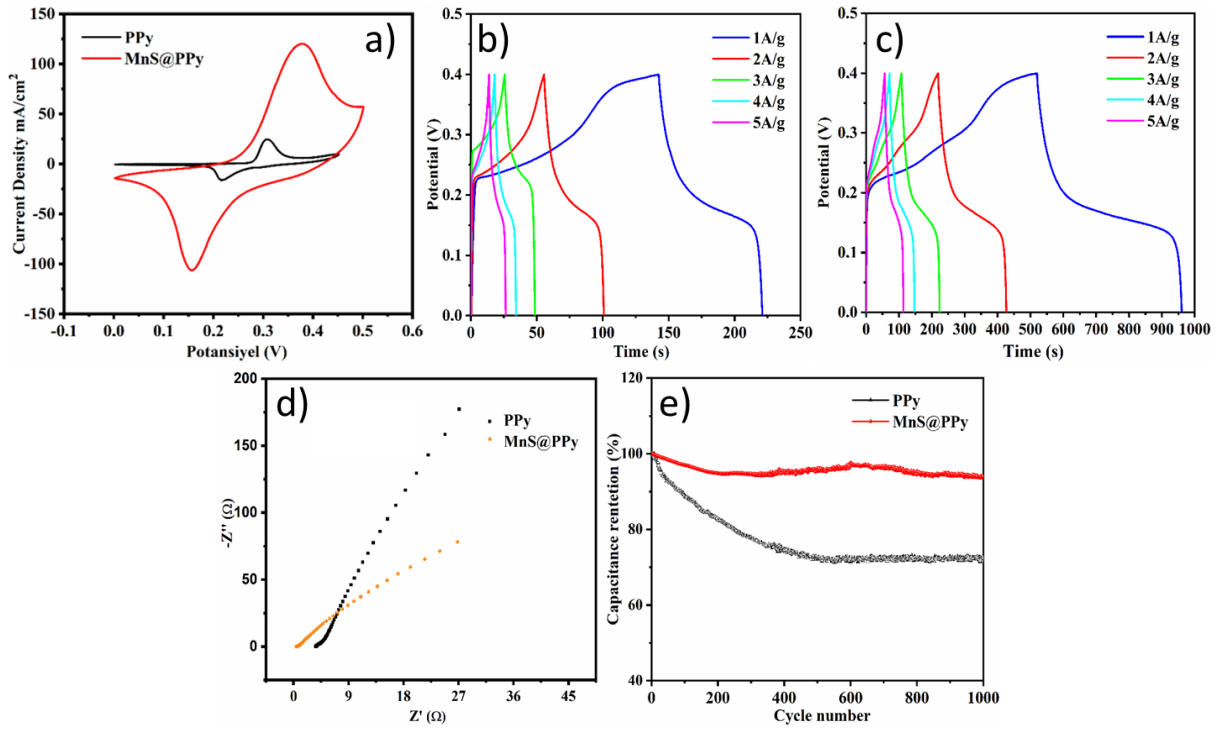


Figure 3. (a) CV curves of electrodes (b) and (c) GCD plots of bare PPy and MnS@PPy at different current densities, respectively (d) EIS and (e) cycle stabilities of bare PPy and MnS@PPy nanocomposite ((a) elektrotların CV eğrileri, (b) ve (c) sırasıyla, saf PPy and MnS@PPy'nin farklı akım yoğunluklarında ölçülen GCD eğrileri, saf PPy and MnS@PPy nanokompozitin (d) EIS ve (e) döngü kararlılıkları)

For practical applications of SCs, capacity retention against number of cycles is an important parameter to consider. As seen in Figure 3e, the specific capacitance of PPy decreased to 72% from its initial value after 1000 cycles, while that of MnS@PPy nanocomposite remain as 95%. The introduction of MnS into the PPy matrix not only increased the electrochemical activity but also significantly increased the cycling stability due to the improvement of stability against to shrinking or swelling.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In briefly, rectangular prism shaped MnS metal sulphide was successfully synthesized by microwave assisted method and MnS@PPy nanocomposite was fabricated directly on NF substrate by electropolymerization method. In this way remedied the need for any conductive additives and insulating binders, which reduces the internal resistance and provides faster charge transfer and high adhesion between the active material and the NF. Moreover, because of the introduction of MnS rectangular prisms into the nanocomposite system, the nucleation and growth kinetics of the PPy polymer differed and the specific surface area expanded as well as the charge transfer kinetics and conductivity improved. Electrochemical results show that MnS@PPy electrode exhibited a specific

capacitance (C_s) of 1102 F/g which is approximately 5.6 times higher than that of the bare PPy (197 F/g). Furthermore, energy density (E_d) of the bare PPy was determined as 4.37 W/kg, by incorporation of MnS into PPy matrix the E_d value increased to 24.5 W/kg. More importantly, after 1000 charge/discharge cycles, the cycle stability of the bare PPy remained at 72%, while that of MnS@PPy nanocomposite electrode recorded as 95 % due to the improvement of PPy stability against to swelling and shrinking during the charge-discharge process. In the light of the results obtained from current study, it is clearly seen that MnS@PPy structured nanocomposite is a promising candidate for SC applications.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This work was supported by Scientific Research Foundation of Bartın University under project No. 2020-FEN-A-020. / Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2020-FEN-A-020 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require

ethical committee approval and/or legal-specific permission.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Mahir GÜLEN: 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] S. Unknown, P. Chand, A. Joshi, Biomass derived carbon for supercapacitor applications: Review, *J Energy Storage*. 39 (2021) 102646. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102646>.
- [2] A. Karimi, I. Kazeminezhad, L. Naderi, S. Shahrokhian, Construction of a Ternary Nanocomposite, Polypyrrole/Fe-Co Sulfide-Reduced Graphene Oxide/Nickel Foam, as a Novel Binder-Free Electrode for High-Performance Asymmetric Supercapacitors, *The Journal of Physical Chemistry C*. 124 (2020) 4393–4407. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b11010>.
- [3] Y.F. Fan, Z.L. Yi, G. Song, Z.F. Wang, C.J. Chen, L.J. Xie, G.H. Sun, F.Y. Su, C.M. Chen, Self-standing graphitized hybrid Nanocarbon electrodes towards high-frequency supercapacitors, *Carbon N Y*. 185 (2021) 630–640. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2021.09.059>.
- [4] Z. Yu, L. Tetard, L. Zhai, J. Thomas, Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions, *Energy Environ Sci*. 8 (2015) 702–730. <https://doi.org/10.1039/C4EE03229B>.
- [5] Q. Meng, K. Cai, Y. Chen, L. Chen, Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials, *Nano Energy*. 36 (2017) 268–285. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2017.04.040>.
- [6] H. Ji, C. Zhang, W. Rao, B. Guo, L. Fan, Z. Bai, H. Bao, J. Xu, Eco-friendly Polypyrrole-coated Cocozelle Composites for Supercapacitor Application, *Fibers and Polymers*. 21 (2020) 1300–1307. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-9375-0>.
- [7] I.K. Durga, S.S. Rao, R.M.N. Kalla, J.W. Ahn, H.J. Kim, Facile synthesis of FeS₂/PVP composite as high-performance electrodes for supercapacitors, *J Energy Storage*. 28 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101216>.
- [8] F. Hamidouche, M.M.S. Sanad, Z. Ghebache, N. Boudieb, Effect of polymerization conditions on the physicochemical and electrochemical properties of SnO₂/polypyrrole composites for supercapacitor applications, *J Mol Struct*. 1251 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2021.131964>.
- [9] R. BoopathiRaja, M. Parthibavarman, Desert rose like heterostructure of NiCo₂O₄/NF@PPy composite has high stability and excellent electrochemical performance for asymmetric super capacitor application, *Electrochim Acta*. 346 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2020.136270>.
- [10] J. Hao, H. Liu, S. Han, J. Lian, MoS₂ Nanosheet-Polypyrrole Composites Deposited on Reduced Graphene Oxide for Supercapacitor Applications, *ACS Appl Nano Mater*. 4 (2021) 1330–1339. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02899>.
- [11] X. Lu, T. Zhai, X. Zhang, Y. Shen, L. Yuan, B. Hu, L. Gong, J. Chen, Y. Gao, J. Zhou, Y. Tong, Z.L. Wang, WO_{3-x}@Au/MnO₂ core-shell nanowires on carbon fabric for high-performance flexible supercapacitors, *Advanced Materials*. 24 (2012) 938–944. <https://doi.org/10.1002/adma.201104113>.

- [12] T. Yi, S. Qi, Y. Li, L. Qiu, Y. Liu, Y. Zhu, J. Zhang, Y. Li, Facile Synthesis of Sheet Stacking Structure NiCo₂S₄@PPy with Enhanced Rate Capability and Cycling Performance for Aqueous Supercapacitors, *Energy Technology*. 8 (2020) 1–13. <https://doi.org/10.1002/ente.202000096>.
- [13] S. Cheng, T. Shi, C. Chen, Y. Zhong, Y. Huang, X. Tao, J. Li, G. Liao, Z. Tang, Construction of porous CuCo₂S₄ nanorod arrays via anion exchange for high-performance asymmetric supercapacitor OPEN, (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07102-1>.
- [14] C.H. Lai, M.Y. Lu, L.J. Chen, Metal sulfide nanostructures: synthesis, properties and applications in energy conversion and storage, *J Mater Chem*. 22 (2011) 19–30. <https://doi.org/10.1039/C1JM13879K>.
- [15] H. Peng, G. Ma, K. Sun, J. Mu, H. Wang, Z. Lei, High-performance supercapacitor based on multi-structural CuS@polypyrrole composites prepared by in situ oxidative polymerization, *J Mater Chem A Mater*. 2 (2014) 3303–3307. <https://doi.org/10.1039/c3ta13859c>.
- [16] W. Huo, X. Zhang, X. Liu, H. Liu, Y. Zhu, Y. Zhang, J. Ji, F. Dong, Y. Zhang, Construction of advanced 3D Co₃S₄@PPy nanowire anchored on nickel foam for high-performance electrochemical energy storage, *Electrochim Acta*. 334 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2020.135635>.
- [17] X. Yan, J. Miao, J. Wang, H. Jiang, M. You, Y. Zhu, J. Pan, High-performance polypyrrole coated MoS₂ nanosheets grown on carbon cloth as electrodes for flexible all-solid-state symmetric supercapacitor, *Mater Sci Eng B Solid State Mater Adv Technol*. 269 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2021.115166>.
- [18] R. Wei, Y. Dong, Y. Zhang, X. Kang, X. Sheng, J. Zhang, Hollow cubic MnS-CoS₂-NC@NC designed by two kinds of nitrogen-doped carbon strategy for sodium ion batteries with extraordinary rate and cycling performance, *Nano Res*. 15 (2022) 3273–3282. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3973-z>.
- [19] Q. Liu, S.J. Zhang, C.C. Xiang, C.X. Luo, P.F. Zhang, C.G. Shi, Y. Zhou, J.T. Li, L. Huang, S.G. Sun, Cubic MnS-FeS₂ Composites Derived from a Prussian Blue Analogue as Anode Materials for Sodium-Ion Batteries with Long-Term Cycle Stability, *ACS Appl Mater Interfaces*. 12 (2020) 43624–43633. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10874>.
- [20] Z.K. Heiba, M.B. Mohamed, S.I. Ahmed, A.M. El-naggar, A. Albassam, Effect of composition ratio on the structural and optical properties of MnS@ZnS nanocomposites, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 31 (2020) 14746–14755. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04038-7>.
- [21] Y. Chen, W. Ma, K. Cai, X. Yang, C. Huang, In Situ Growth of Polypyrrole onto Three-Dimensional Tubular MoS₂ as an Advanced Negative Electrode Material for Supercapacitor, *Electrochim Acta*. 246 (2017) 615–624. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2017.06.102>.
- [22] N.A. Niaz, A. Shakoor, M. Imran, N.R. Khalid, F. Hussain, H. Kanwal, M. Maqsood, S. Afzal, Enhanced electrochemical performance of MoS₂/PPy nanocomposite as electrodes material for supercapacitor applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 31 (2020) 11336–11344. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03682-3>.
- [23] S. Ahmad, I. Khan, A. Husain, A. Khan, A.M. Asiri, Properties of Polypyrrole / MoS₂ Nanocomposite, (2020) 1–13.
- [24] A. Husain, S.A. Al-Zahrani, A. Al Otaibi, I. Khan, M.M.A. Khan, A.M. Alosaimi, A. Khan, M.A. Hussein, A.M. Asiri, M. Jawaid, Fabrication of reproducible and selective ammonia vapor sensor-pellet of

- polypyrrole/cerium oxide nanocomposite for prompt detection at room temperature, *Polymers* (Basel). 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13111829>.
- [25] S. Abdi, M. Nasiri, A. Mesbahi, M.H. Khani, Investigation of uranium (VI) adsorption by polypyrrole, *J Hazard Mater.* 332 (2017) 132–139. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.01.013>.
- [26] L. Seid, D. Lakhdari, M. Berkani, O. Belgherbi, D. Chouder, Y. Vasseghian, N. Lakhdari, High-efficiency electrochemical degradation of phenol in aqueous solutions using Ni-PPy and Cu-PPy composite materials, *J Hazard Mater.* 423 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126986>.
- [27] X. Xiong, J. Chen, D. Zhang, A. Li, J. Zhang, X. Zeng, Hetero-structured nanocomposites of Ni/co/O/S for high-performance pseudo-supercapacitors, *Electrochim Acta.* 299 (2019) 298–311. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2018.12.178>.
- [28] S. Kumar, S. Riyajuddin, M. Afshan, S.T. Aziz, T. Maruyama, K. Ghosh, In-Situ Growth of Urchin Manganese Sulfide Anchored Three-Dimensional Graphene (γ -MnS@3DG) on Carbon Cloth as a Flexible Asymmetric Supercapacitor, *Journal of Physical Chemistry Letters.* 12 (2021) 6574–6581. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c01553>.
- [29] S.C. Song, D.C. Zuo, C.S. An, X.H. Zhang, J.H. Li, Z.J. He, Y.J. Li, J.C. Zheng, Self-assembled GeOX/Ti3C2TX Composites as Promising Anode Materials for Lithium Ion Batteries, *Inorg Chem.* 59 (2020) 4711–4719. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b03784>.
- [30] T. Xu, G. Li, X. Yang, Z. Guo, L. Zhao, Design of the seamless integrated C@NiMn-OH-Ni3S2/Ni foam advanced electrode for supercapacitors, *Chemical Engineering Journal.* 362 (2019) 783–793. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.01.083>.
- [31] Y. Wang, J. Huang, Y. Xiao, Z. Peng, K. Yuan, L. Tan, Y. Chen, Hierarchical nickel cobalt sulfide nanosheet on MOF-derived carbon nanowall arrays with remarkable supercapacitive performance, *Carbon N Y.* 147 (2019) 146–153. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2019.02.082>.
- [32] S. Liu, K.S. Hui, K.N. Hui, 1 D Hierarchical MnCo2O4 Nanowire@MnO2 Sheet Core–Shell Arrays on Graphite Paper as Superior Electrodes for Asymmetric Supercapacitors, *ChemNanoMat.* 1 (2015) 593–602. <https://doi.org/10.1002/cnma.201500105>.
- [33] K.Y. Yasoda, S. Kumar, M.S. Kumar, K. Ghosh, S.K. Batabyal, Fabrication of MnS/GO/PANI nanocomposites on a highly conducting graphite electrode for supercapacitor application, *Mater Today Chem.* 19 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2020.100394>.
- [34] X. Li, M. Zhang, L. Wu, Q. Fu, H. Gao, Annealing temperature dependent ZnCo2O4 nanosheet arrays supported on Ni foam for high-performance asymmetric supercapacitor, *J Alloys Compd.* 773 (2019) 367–375. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2018.09.197>.

The effect of reinforcement ratio on corrosion properties of Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composites produced by hot pressing

Hasan KARABULUT^{1,*}  Kubilay KARACİF² 

¹Karabük University, TOBB Technical Sciences Vocational School, Department of Metallurgy, 78050, KARABÜK

²Hittit University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 19030, ÇORUM

Article Info:

Research article
Received:
05/12/2022
Accepted:
31/03/2023

Keywords

Hot pressing
AA2024
Al₂O₃
Corrosion
Aluminum
Powder
metallurgy

Makale Bilgisi

Araştırma
makalesi
Başvuru:
05/12/2022
Kabul:
31/03/2023

Anahtar Kelimeler

Sıcak Presleme
AA2024
Al₂O₃
Korozyon
Alüminyum
Toz Metalurjisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, corrosion properties of AA2024 aluminum alloy matrix composite materials reinforced with Al₂O₃ in three different ratios were investigated. / Bu çalışmada, üç farklı oranda Al₂O₃ takviyesi içeren AA2024 alüminyum alaşımı matrisli kompozit malzemelerin korozyon özellikleri incelenmiştir.

Proportions of matrix and reinforcement powders (AA2024-10%, 20%, 30% Al ₂ O ₃) / Matris ve takviye tozlarının oranları (AA2024-%10, %20, %30 Al ₂ O ₃)	Mixing / Karıştırma	Hot pressing (50 MPa Pressure, 550°C Temperature) / Sıcak presleme (50 MPa Basınç, 550°C Sıcaklık)	Samples / Numuneler	Microstructure and density studies / Mikroyapı ve yoğunluk çalışmaları	Corrosion studies / Korozyon çalışmaları
---	---------------------	--	---------------------	--	--

Figure A. Experimental work steps / Şekil A. Deneysel çalışma aşamaları

Highlights (Önemli noktalar)

- Electrochemical Corrosion. / Elektrokimyasal korozyon
- Effect of Reinforcement. / Takviye etkisi
- Aluminum Alloy Composites. / Alüminyum alaşımlı kompozitler

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to investigate the corrosion behavior, which is one of the most important surface properties, of 10%, 20% and 30% Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composite materials produced by powder metallurgy method and hot pressing method. / Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ve sıcak presleme yöntemi ile üretilen %10, %20 ve %30 Al₂O₃ takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin en önemli yüzey özelliklerinden biri olan korozyon davranışının araştırılması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Regarding aluminum matrix composite materials, it is seen that studies in the literature are generally on mechanical properties and corrosion studies are limited. For this reason, in this study, the corrosion behavior of AA2024 based Al₂O₃ reinforced composites produced by hot pressing method were investigated. / Alüminyum matrisli kompozit malzemeler ile ilgili olarak literatürdeki çalışmaların genellikle mekanik özellikler üzerine olduğu ve korozyon çalışmalarının sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sıcak presleme yöntemi ile üretilen AA2024 esaslı Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin korozyon davranışları incelenmiştir.

Results (Bulgular): Corrosion data of composite materials are given in Table 1 below. / Kompozit malzemelerin korozyon verileri aşağıda Tablo 1 de verilmiştir.

Reinforcement Ratio / Takviye Oranı	Corrosion Potential (V) / Korozyon Potansiyeli	Corrosion Current Density (A/cm ²) / Korozyon Akım Yoğunluğu	Corrosion Rate (mm/y) / Korozyon Hızı
AA2024 + 10% Al ₂ O ₃	-1.277	1.984.10 ⁻⁵	0.216
AA2024 + 20% Al ₂ O ₃	-1.210	7.438.10 ⁻⁶	0.081
AA2024 + 30% Al ₂ O ₃	-1.219	7.299.10 ⁻⁶	0.079

Table A. Corrosion data of 10%, 20% and 30% Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composite materials / Tablo A. %10, %20 ve %30 Al₂O₃ takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon verileri

Conclusion (Sonuç): It is thought that Al₂O₃ reinforcement, which is more noble electrochemically to the aluminum matrix, is effective in decreasing the corrosion rate and improving corrosion resistance with the increase in the reinforcement ratio. / Alüminyum matrisle elektrokimyasal olarak daha asil olan Al₂O₃ takviye oranının artmasıyla birlikte korozyon hızını düşürmede ve korozyon direncini iyileştirmede etkili olduğu düşünülmektedir.



The effect of reinforcement ratio on corrosion properties of Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composites produced by hot pressing

Hasan KARABULUT^{1,*} Kubilay KARACİF²

¹Karabük University, TOBB Technical Sciences Vocational School, Department of Metallurgy, 78050, KARABÜK

²Hittit University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 19030, ÇORUM

Article Info

Research article
Received: 05/12/2022
Accepted: 31/03/2023

Keywords

Hot pressing
AA2024
Al₂O₃
Corrosion
Aluminum
Powder metallurgy

Abstract

In this study, corrosion properties of AA2024 aluminum alloy matrix composite materials reinforced with Al₂O₃ in three different ratios were investigated. After mixing the aluminum alloy matrix material powders and the reinforcement material powders at 10%, 20% and 30% Al₂O₃ ratios homogeneously, composite materials were produced by keeping them in an axial mold under 50 MPa pressure and 550 °C temperature for 1 hour by hot pressing method. According to the corrosion test results, the corrosion resistance of the composite materials containing 20% and 30% Al₂O₃ reinforcement was very close to each other. The corrosion rates of these two samples were determined to be lower than the sample containing 10% Al₂O₃ reinforcement.

Sıcak Presleme ile Üretilen AA2024 Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Takviyeli Kompozitlerde Takviye Oranının Korozyon Özelliklerine Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/12/2022
Kabul: 31/03/2023

Anahtar Kelimeler

Sıcak Presleme
AA2024
Al₂O₃
Korozyon
Alüminyum
Toz Metalurjisi

Öz

Bu çalışmada üç farklı oranda Al₂O₃ ile takviye edilmiş AA2024 alüminyum alaşımı matrisli kompozit malzemelerin korozyon özellikleri araştırılmıştır. Alüminyum alaşımı matris malzemesi tozları ile %10, %20 ve %30 Al₂O₃ oranlarında takviye malzemesi tozları homojen şekilde karıştırıldıktan sonra sıcak presleme yöntemiyle tek yönlü olarak aksel kalıp içerisinde 50 MPa basınç altında, 550 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle bekletilerek kompozit malzemelerin üretimi yapılmıştır. Korozyon test sonuçlarına göre %20 ve %30 Al₂O₃ takviye içeren kompozit malzemelerin korozyon dayanımları birbirlerine çok yakın olmuştur. Bu iki numunenin korozyon hızları %10 Al₂O₃ takviye içeren numuneye göre daha düşük olarak belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In order to improve the mechanical properties of aluminum alloys such as hardness, yield-tensile strength, fatigue strength, and abrasion resistance, macro-size hard reinforcement elements are added to the aluminum matrix, and aluminum matrix composite materials with superior properties are produced and used in many areas. Generally, various ceramic compounds are preferred as reinforcement materials. Alumina (Al₂O₃) is one of the most used reinforcement elements among these reinforcement materials due to its superior properties such as high stability, inertness and high

temperature resistance. Aluminum matrix composite materials are used in aviation, marine and land vehicles industry, mining industry and in many other fields [1-5]. Aluminum matrix composite materials can be produced by one of the liquid, liquid-solid and solid production methods. Powder metallurgy method is also one of the solid production methods used in production. Among the production methods, the method in which the reinforcement material can be distributed uniformly in the matrix material, the pore formation can be controlled, and good interfacial bonding between the matrix material and the reinforcement material should be preferred [6-8].

The results of some studies on the corrosion behavior of alumina reinforced aluminum matrix composite materials are given below. Alanemea, K.K. and Olubambi, P.A [4], in their study where they examined the effect of the addition of rice husk ash on the corrosion behavior of Al_2O_3 reinforced aluminum matrix composite material in salty environment, reported that this addition increased the corrosion rate due to its accumulation at the interface of reinforcement and matrix. In a study investigating the effects of Al_2O_3 reinforcement ratio on corrosion, it was observed that corrosion resistance decreased with increasing reinforcement ratio in aluminum matrix composite material in seawater and industrial atmosphere [7]. In addition, it was observed that the corrosion resistance was less in seawater environment, especially pitting corrosion was effective in this environment, and it was noticed that grain boundary corrosion was more effective in the industrial environment. De Salazar, J.M.G. et al. [8] stated that the heat treatments applied to the material to improve the mechanical properties of Al_2O_3 reinforced aluminum matrix composite materials affect the corrosion behavior of the material. Dobrzanski, L.A. [9] reported that the corrosion rate of the composite material increased when the Al_2O_3 ratio was increased excessively in the Al_2O_3 particle reinforced aluminum matrix composites produced by the powder metallurgy method, and the addition of Al_2O_3 at lower rates was not effective on the corrosion properties. Durai, T. G. et al. [10] investigated the effects of Mn addition in Al_2O_3 reinforced aluminum matrix composite materials and determined that the addition of Mn at low rates improved corrosion resistance. Zhu, J. and Hihara, L. H. [11] reported that the corrosion resistance of metal matrix composites reinforced with alumina continuous fiber is lower than that of non-reinforced aluminum matrix material, and corrosion begins at the fiber-matrix interface. Hu, J. et al. [12] reported that the corrosion potential of heat-treated aluminaborate-reinforced aluminum composite in a salty environment changed negatively with solution heat treatment. It was evaluated that this negative change was caused by the interfacial reactions in the solution taking process. Lotto, R.T. and Babalola, P. [13] investigated the corrosion behavior of aluminum matrix composite materials containing nano-sized alumina, and determined that the corrosion resistance of the material is better when the alumina ratio is increased and the particle size is small. Saxena, M. et al. [14] reported that the deterioration

of the continuity of the oxide film by breaking the oxide film is effective in the reduction of corrosion resistance in aluminum matrix composite materials compared to pure aluminum. Karabulut H. et al. [15] investigated the corrosion behavior of B_4C , SiC and Al_2O_3 reinforced aluminum matrix composites produced by mechanical alloying for 4 and 10 hours in salt water (3.5% NaCl). After mechanical alloying, the mixed powders were compressed under 700 MPa pressure and sintered at 600 °C. Electrochemical corrosion tests were applied to the samples in the salt water solution using potentiodynamic methods. According to the research results, the best corrosion resistance was obtained from aluminum/ B_4C composites. Karacif K. [16] investigated the hardness and corrosion properties of functional graded AA5083/ Al_2O_3 composites produced by powder metallurgy method. There was a small decrease in the corrosion rate of the materials with the increasing number of layers in functionally graded materials, and it was determined that the corrosion effect was higher in layers with high alumina reinforcement. On the other hand, Özay Ç. and Karlıdağ Ö.E. [17] coated the surface of the AA2024 alloy substrate with Al- B_4C reinforced composite using hot press sintering. Al and B_4C powders were synthesized by mechanical alloying. The microstructure of the Al/ B_4C composite coating, the macrohardness of the coating layer, linear reciprocating motion and forward wear resistance were investigated. In addition, Karabulut H. [18] previously produced composite materials with two different Al_2O_3 reinforcements, 10% and 20%, by hot pressing at 550 °C and investigated the effect of reinforcement amount on properties such as density, hardness and wear. As a result of this study, it was found that the density value decreased slightly with the increase in the amount of reinforcement; it was determined that the hardness and wear resistance increased.

In this study, corrosion behavior, which is one of the most important surface properties, of AA2024 aluminum matrix composite materials reinforced with 10%, 20% and 30% Al_2O_3 produced by powder metallurgy method by hot pressing was investigated. In order to interpret the changes in these properties, the microstructure and density properties of the materials were also evaluated.

2.MATERIALS AND METHODS (MALZEME VE METOD)

2.1. Material Production (Malzeme Üretimi)

The production of Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composite samples to be used in the study was made by powder metallurgy method. The average particle size of the reinforcement material Al₂O₃ powders is 10 μm. The chemical

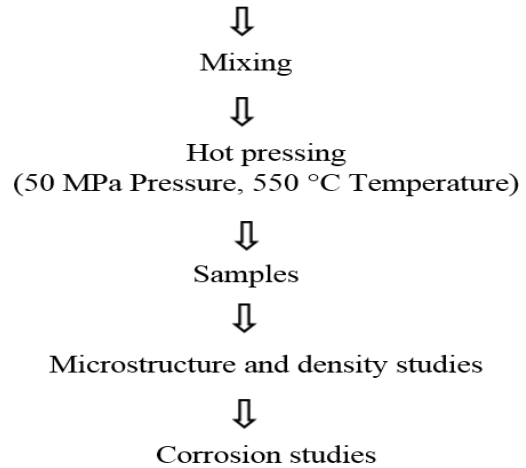
composition of the AA2024 aluminum alloy, which is the matrix material, is given in Table 1 [19].

Table 1. Chemical composition of AA2024 alloy (AA2024 alaşının kimyasal kompozisyonu)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other (Each)	Other (Total)	Al
2024	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	Remainder

In the first stage of material production, the matrix and reinforcement material powders, which were weighed with a precision of 0.0001 g, with a RADWAG AS-60-220 C/2 precision balance containing 10%, 20% and 30% Al₂O₃ by weight, were made ready for mixing. The powders weighed according to the specified ratios were mixed with a Turbula brand triaxial mixer for one hour without a ball and became homogeneous. The obtained mixed powders were kept in an axial mold under 50 MPa pressure, at 550 °C temperature for 1 hour in a one-way axial mold, and they were turned into blocks by hot pressing method. Hot pressing of powders was done in MSE HP 1200 brand device. Experimental work steps are given on the side.

Matrix and reinforcement material powders (AA2024-10%, 20%, 30% Al₂O₃)



2.2. Microstructure and Density Studies

(Mikroyapı ve Yoğunluk Çalışmaları)

Nikon inverted metallurgical microscope was used for the microstructure images of the composite samples, for which metallographic preparation studies such as sanding and polishing were made. Density measurements of the samples were determined by Archimedes principle. The relative densities of the samples were calculated by using the found density value and the theoretical density values.

2.3. Corrosion Studies (Korozyon Çalışmaları)

Electrochemical corrosion tests were carried out in salt water environment to determine the corrosion properties of the samples. In corrosion studies,

potentiostat/galvanostat device and 3.5% NaCl solution were used as salt water medium. In the corrosion tests, the general corrosion behavior was observed by obtaining the polarization curves by scanning the potential between -2 V and -0.5 V in the first stage, and the Tafel polarization curves were obtained by applying the potential between -1.6 V and -0.7 V in the second stage. A scanning rate of 1 mV/s was used for potential scanning. Corrosion potentials, corrosion current densities and corrosion rates of the samples were determined from the Tafel polarization curves. These data are calculated by the system with the software used with the potentiostat/galvanostat device.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION (DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

3.1. Microstructure and Density Results

(Mikroyapı ve Yoğunluk Sonuçları)

The microstructure images of AA2024 aluminum matrix composite materials containing three different ratios of Al_2O_3 reinforcement are given in Figure 1. From the microstructure images, it is seen that the Al_2O_3 reinforcement elements exhibit a homogeneous distribution in general. From the microstructure images, it can be said that the dark colored particles with an average size of $10 \mu m$ are

Al_2O_3 reinforcement material, the smaller dark colored particles are copper and magnesium in AA 2024, and the light colored parts are aluminum. In addition, there is a homogeneous distribution in composites containing 30% reinforcement element, but some aggregation is observed. This may be due to the fact that the Al_2O_3 particles have a harder structure than the matrix due to the increase in the reinforcement ratio during pressing, although a homogeneous distribution is initially achieved with the triaxial mixer.

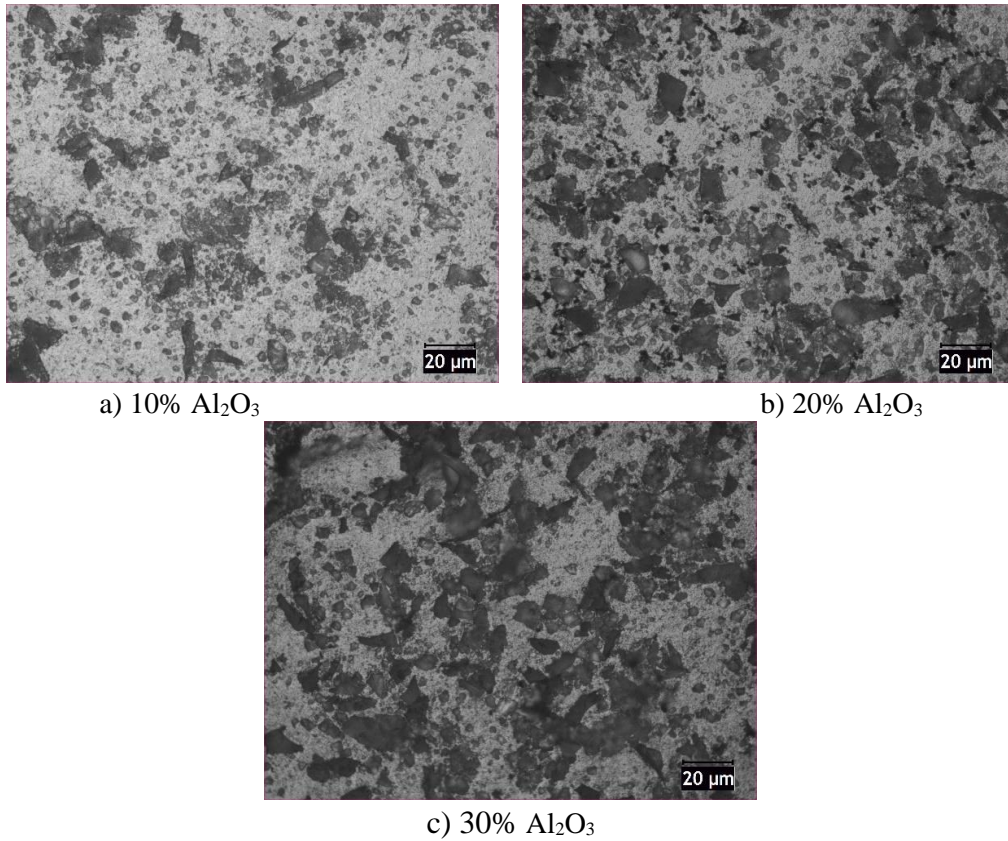


Figure 1. Microstructure images of aluminum matrix composite samples containing (a) 10%, (b) 20% and (c) 30% Al_2O_3 ((a) %10, (b) %20 ve (c) %30 Al_2O_3 içeren alüminyum matrisli kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri)

In Table 2, the density values of 10% and 20% Al_2O_3 reinforced composite materials taken from Karabulut's study [18] and the density values of 30% Al_2O_3 reinforced composite materials measured in this study are given together for comparison. As can be seen from this table, there is a decrease in the density of the composite material with the increase of the Al_2O_3 reinforcement ratio. While the relative density of the composite material containing 10% reinforcement is 98%, the relative density value decreases to 97% when the

reinforcement ratio is 20%, and the relative density value decreases to 95% when the reinforcement ratio is increased to 30%. According to this table, it can be said that the pore ratio of the composite material increases with the increase in the reinforcement ratio, while the density values decrease. It is thought that the decrease in material density with increasing reinforcement ratio may be due to the fact that the hard Al_2O_3 reinforcement material adversely affects the compressibility of the powders during hot pressing. When the compaction

property of the powders weakens, some more pores may remain in the composite material structure.

Table 2. Density values of AA2024 aluminum matrix composite materials reinforced with Al_2O_3 at different ratios (Farklı oranlarda Al_2O_3 takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri)

Al_2O_3 Reinforcement Ratio (wt.%)	Relative Density (%)
10	98 ± 1
20	97 ± 1
30	95 ± 1

3.2. Corrosion Results (Korozyon Sonuçları)

The polarization curves of aluminum matrix composite materials reinforced with Al_2O_3 at different ratios are given in Figure 2. In order to obtain the polarization curves, a potential scan was made between -2.0 V and -0.5 V, and in this potential scanning, polarization curves were obtained with the change of current passing through the material. The potential application was started from the cathodic potential region, that is, the immunity potential without corrosion, was increased in the positive direction to the anodic region, the corrosion region, and returned to the initial cathodic potential. The potential scanning

direction is indicated by the arrow on the polarization curves. In all three samples with different ratios of Al_2O_3 reinforcement, the current level passing through the material is low, up to a potential value of approximately -0.7 V. Although the potential application in this region is increased in the anodic direction, there is no increase in current. The passive oxide layer formed on the aluminum composite surface in this region, which is the post-immune passivity zone, stops the current increase, that is, corrosion. At a potential value of -0.7 V, the protective passive oxide film breaks down and the current increases rapidly. So the -0.7 V potential is the passivity decay potential. At this potential value, chloride ions in the salt water environment are very effective in the deterioration of the passive film on the material surface. Chloride ions are very aggressive and have the ability to disrupt the passive film. In polarization curves, the current values in the return potential are higher than the values in the going direction. Accordingly, corrosion continues in the material up to a slightly more negative potential, a potential value of -0.8 V, on the return.

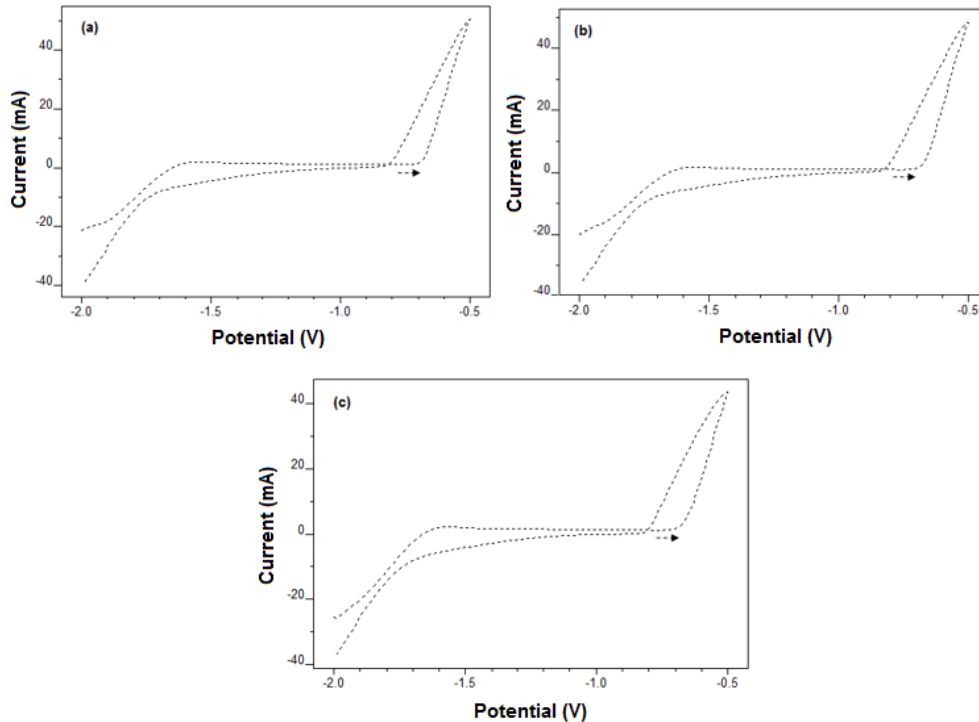


Figure 2. Polarization curves of (a) 10%, (b) 20% and (c) 30% Al_2O_3 reinforced AA2024 aluminum matrix composite materials ((a) %10, (b) %20 ve (c) %30 oranlarında Al_2O_3 takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin polarizasyon eğrileri)

Tafel polarization curves of aluminum matrix composite materials reinforced with different ratios of Al₂O₃ are given in Figure 3 and the corrosion numerical results are given in Table 3. Corrosion potentials in the horizontal axis and corrosion currents in the vertical axis were determined by intersecting the linear lines drawn from the cathodic and anodic arms of the Tafel polarization curves. Corrosion current densities were determined by dividing the corrosion current values by the material surface area. The corrosion rate of the material was calculated based on the corrosion current with the computer aided corrosion test device software.

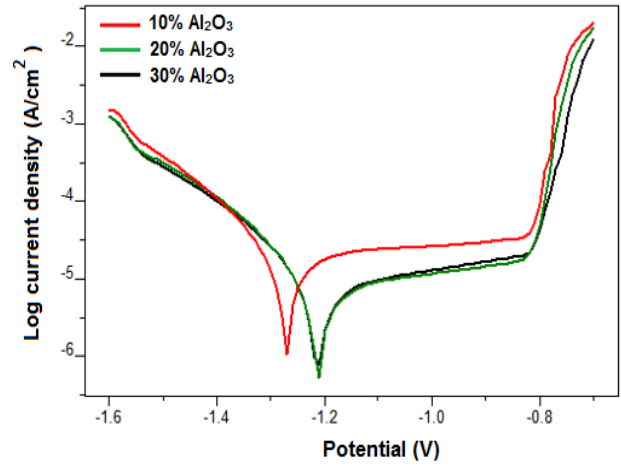


Figure 3. Tafel polarization curves of 10%, 20% and 30% Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composite materials (%10, %20 ve %30 oranlarında Al₂O₃ takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin Tafel polarizasyon eğrileri)

Table 3. Corrosion data of 10%, 20% and 30% Al₂O₃ reinforced AA2024 aluminum matrix composite materials (%10, %20 ve %30 oranlarında Al₂O₃ takviyeli AA2024 alüminyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon verileri)

Reinforcement Ratio / Takviye Oranı	Corrosion Potential (V) / Korozyon Potansiyeli	Corrosion Current Density (A/cm ²) / Korozyon Akım Yoğunluğu	Corrosion Rate (mm/y) / Korozyon Hızı
AA2024 + 10% Al ₂ O ₃	-1.277	1.984.10 ⁻⁵	0.216
AA2024 + 20% Al ₂ O ₃	-1.210	7.438.10 ⁻⁶	0.081
AA2024 + 30% Al ₂ O ₃	-1.219	7.299.10 ⁻⁶	0.079

When the Tafel curves given in Figure 3 and the corrosion numerical results given in Table 3 are examined, it is seen that the Tafel curves and corrosion potential, corrosion current density and corrosion rate values of 20% and 30% Al₂O₃ reinforced composite materials are very close to each other. There is a difference of only 0.009 V between the corrosion potentials of these two composite samples, 0.139.10⁻⁶A/cm² between the corrosion current densities and only 0.002 mm/y between the corrosion rates. The corrosion potential value of the 10% Al₂O₃ reinforced composite material is more negative than the other two samples containing higher reinforcement, and the corrosion current density and corrosion rate values are approximately 2.5 times higher. The fact that the corrosion potential value of the 10% Al₂O₃ reinforced composite material is more negative than the others, the corrosion current density and corrosion rates are higher, show that the corrosion resistance of this sample is lower. In the case of

corrosion of the Al₂O₃ reinforced AA2024 matrix composite material, the Al₂O₃ reinforcement material is more resistant to corrosion because it is in a ceramic structure. In other words, it shows a more noble behavior electrochemically in corrosion. As in composite materials, in materials consisting of structural components with different electrochemical properties, structural elements and zones with noble behavior form cathodic zones in corrosion. AA2024 aluminum alloy contains various alloying elements in its composition. Among these alloying elements, especially magnesium and zinc, they are very active electrochemically, that is, they are very sensitive to oxidation reaction. Metal dissolution and corrosion occurs as a result of the anodic reaction in very active building elements and areas. The matrix material in 10% Al₂O₃ reinforced composite material is 90% and the matrix ratio is higher than the other two materials. Although there is a slight increase in the pore ratio, which adversely affects

corrosion, with the increase of the reinforcement element ratio, it is thought that the increase in the electrochemically more noble Al_2O_3 reinforcement is more effective in improving corrosion resistance. Lotto, R.T. and Babalola, P. [13] found similar results in a study on the corrosion properties of alumina-reinforced AA1070 aluminum alloy matrix composites. In the corrosion tests performed in acidic, salty and acidic/saline mixed environments, it has been reported that the corrosion rate decreases with the increase in the alumina reinforcement ratio.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the microstructure, density and corrosion properties of AA2024 aluminum alloy matrix composite materials produced by powder metallurgy method using hot pressing and reinforced with Al_2O_3 in three different ratios, 10%, 20% and 30%, were investigated, and the following results were obtained.

1. According to the microstructure images of the composite samples, it is seen that the Al_2O_3 reinforcement material is uniformly distributed in the structure, and accordingly, the powder metallurgy method is suitable for the production of this type of composite material.
2. In AA2024 aluminum composite samples reinforced with Al_2O_3 , the composite material density decreased with the increase of Al_2O_3 reinforcement ratio to 30%. It is thought that the increase in the reinforcement ratio in the hard structure negatively affects the compressibility feature during pressing in production with powder metallurgy in this decrease in density.
3. The corrosion behavior of the composite materials at 20% and 30% Al_2O_3 reinforcement ratios are very close to each other, and their corrosion rates were lower than the composite materials with 10% Al_2O_3 reinforcement ratios. It is thought that Al_2O_3 reinforcement, which is more noble electrochemically to the aluminum matrix, is effective in decreasing the corrosion rate and improving corrosion resistance with the increase in the reinforcement ratio.

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)

Hasan KARABULUT: He produced composite materials, measured the density, reviewed the results and contributed to the writing of the article.

Kompozit malzemeleri üretmiş, yoğunluğunu ölçmüş, sonuçları yorumlamış ve makalenin yazılmasına katkıda bulunmuştur.

Kubilay KARACİF: He performed corrosion tests of composite materials, reviewed the results and contributed to the writing of the article.

Kompozit malzemelerin korozyon testlerini yapmış, sonuçları yorumlamış ve makalenin yazılmasına 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] Riahi A.R., Alpas, A.T. The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites. *Wear*. 2001; 251: 1396-1407.
- [2] Jun D., Liu, Y.H., Yu, S.R., Li, W.F. Dry sliding friction and wear properties of Al_2O_3 and carbon short fibres reinforced Al-12Si alloy hybrid composites. *Wear*. 2004; 257: 930-940.
- [3] Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Ravikumar, K.S., Madhusudan, B.M. Mechanical properties of Al_2O_3 reinforced cast and hot extruded Al based metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4: 2771-2776.
- [4] Alaneme, K.K., Olubambi, P.A. Corrosion and wear behaviour of rice husk ash-alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites. *Journal of Materials Research Technology*. 2013; 2: 188-194.
- [5] Saraswathi, Y.L., Das, S., Mondal, D.P. Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion-corrosion behavior of

- Al alloy composites. *Materials Science and Engineering A*. 2006; 425: 244-254.
- [6] Chandrashekar A, Ajaykumar, B.S., Reddappa, H.N. Mechanical, structural and corrosion behaviour of AlMg4.5/Nano Al₂O₃ metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 5: 2811-2817.
- [7] Shanbhag, V.V., Yalamoori, N.N., Karthikeyan, S., Ramanujam, R., Venkatesan, K. Fabrication, surface morphology and corrosion investigation of Al 7075- Al₂O₃ matrix composite in seawater and industrial environment. *Procedia Engineering*. 2014; 97: 607-613.
- [8] De Salazar, J.M.G., Urena, A., Manzanedo, S., Barrena, M.I. Corrosion behavior of AA6061 and AA7005 reinforced with Al₂O₃ particles in aerated %3.5 chloride solutions: potentiodynamic measurements and microstructure evaluation. *Corrosion Science*. 1999; 41: 529-545.
- [9] Dobrzanski, L.A., Wlodarczyk, A., Adamiak, M. Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al₂O₃ ceramic particles. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; 162: 27-32.
- [10] Durai, T.G., Das, K., Das, S. Corrosion behavior of Al-Zn/ Al₂O₃ and Al-Zn-X/ Al₂O₃ composites synthesized by mechanical-thermal treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008; 462: 410-415.
- [11] Zhu, J., Hihara, L.H. Corrosion of continuous alumina-fibre reinforced Al-2 wt.% Cu-T6 metal matrix composite in 3.15 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*. 2010; 52: 406-415.
- [12] Hu, J., Chu, W.Y., Fei, W.D., Zhao, L.C. Effect of interfacial reaction on corrosion behavior of alumina borate whisker reinforced 6061 Al composite. *Materials Science and Engineering A*. 2004; 374: 153-159.
- [13] Loto, R.T., Babalola, P. Effect of alumina nano-particle size and weight content on the corrosion resistance of AA1070 aluminum in chloride/sulphate solution. *Results in Physics*. 2018; 10: 731-737.
- [14] Saxena, M., Modi, O.P., Prasad, B.K., Jha, A.K. Erosion and corrosion characteristics of an aluminium alloy-alumina fibre composite. *Wear*. 1993; 169, 1: 119-124.
- [15] Karabulut, H., Karacif, K., Çıtak, R., Çinici, H. Corrosion behavior of particle reinforced aluminum composites. *Materials Testing*. 2021; 63, 12: 1157-1163.
- [16] Karacif, K. Hardness and corrosion properties of functionally graded AA5083/Al₂O₃ composites produced by powder metallurgy method. *International Journal of Materials Research*. 2020; 111, 9: 719-725.
- [17] Özay, Ç., Karlıdağ, Ö.E. Hot press sintering effects and wear resistance of the Al-B₄C composite coatings of an AA-2024 alloy. *Materials Testing*. 2021; 63, 12: 1150-1156.
- [18] Karabulut, H. Al2024 matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretiminde takviye oranının mikroyapı, sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*. 2020; 15, 1: 8-14.
- [19] <https://unitedaluminum.com/aluminum-technical-data-alloy-chemistry-and-mechanical/>

Türkiye’de Yapılan Siber Güvenlik Faaliyetlerinin ve Eğitim Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Hüseyin ÇAKIR¹ , Murat TAŞER^{2,*} 

¹Gazi University Faculty of Education, Department of Computer Education and Instructional Technology, Yenimahalle/ANKARA

²Pamukkale University Hospitals, Chief Directorate, Pamukkale/DENİZLİ

Article Info

Review article

Received: 22/08/2022

Revision: 08/10/2022

Accepted: 25/10/2022

Keywords

Cyber Security
Cyber Law
Cyber Attacks
Cyber Crimes
Critical Infrastructures

Makale Bilgisi

Derleme makalesi

Başvuru: 22/08/2022

Düzeltilme: 08/10/2022

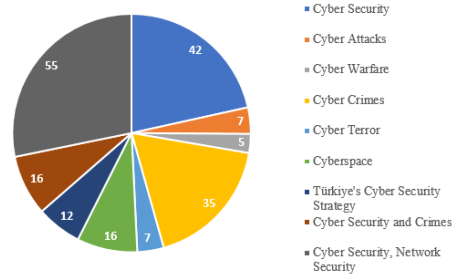
Kabul: 25/10/2022

Anahtar Kelimeler

Siber Güvenlik
Siber Hukuk
Siber Saldırı
Siber Suç
Kritik Altyapılar

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Günümüzde giderek artan siber suçlar, ülkelerin karşı stratejiler geliştirmesine gerektirmiştir. Türkiye'nin de güvenlik açığı oluşmaması adına siber güvenlikte hangi aşamada olduğunu tespit etmesi gerekmektedir (Today, increasing cybercrimes have required countries to develop counter-strategies. Turkey also needs to determine where it stands in cyber security in order to avoid a security gap).



Şekil A: Çalışmada incelenen yayınlar/ Figure A: Publications examined in the study

Önemli noktalar (Highlights)

- Siber güvenlik sistemleri takibi için daha fazla personel istihdam edilmelidir. / More personnel should be employed to monitor cyber security systems.
- Son zamanlarda yapılan çalışmalar Türkiye’de siber güvenlik farkındalığını üst seviyelere taşımıştır. / Recent studies have raised cyber security awareness in Turkey to high levels.
- Alınacak önlemlerle, kamu bilişim uzmanlarıyla özel kuruluşların ortak faaliyetlerde bulunmaları kolaylaştırılmalıdır. / It should be facilitated for public informatics experts and private organizations to engage in joint activities through solutions.

Amaç (Aim): Araştırmada, Türkiye’de siber güvenlik alanında son yirmi yılda yapılan çalışma, strateji ve politikaların incelenmesi, olumlu ve olumsuz yönlerin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. / This study aims to examine the studies, strategies and policies in the field of cyber security in Turkey in the last two decades and to reveal the positive and negative aspects.

Özgünlük (Originality): Çalışmada Türkiye’de siber güvenlik alanındaki tehditler ve geliştirilmesi gereken alanlar değerlendirilmiştir. Eksikliklerin tespiti açısından yol gösterici bir çalışma olmuştur. / The study evaluated the threats and areas that need to be improved in the field of cyber security in Turkey. It has been a guiding study in terms of identifying deficiencies.

Bulgular (Results): Türkiye’de siber Güvenlik alanında 2000’li yıllarda alınan yetersiz kısmi önlemlerden sonra 2012 yılında "Siber Güvenlik Kurulu" kurularak ilk ciddi önlemler alınmaya başlanmıştır. Ancak bilişim suçlarının mevzuat boyutu hala yeterince incelenmemiştir. / After the inadequate partial measures taken in the field of cyber security in Turkey in the 2000s, the first serious measures were taken by establishing the "Cyber Security Board" in 2012. However, the legislative dimension of cybercrimes has still not been sufficiently examined.

Sonuç (Conclusion): Akademik çalışmaların artması, yerli ve milli yazılımların yaygınlaşması, ASELSAN ve STM gibi firmaların donanım-yazılım ürünlerinin ortaya çıkması, Türkiye’nin yakın gelecekte siber güvenlikte iyi bir seviyede olacağına işaret ediyor. / Increasing academic studies, the expansion of domestic and national software, and the emergence of hardware-software products by companies such as ASELSAN and STM indicate that Turkey will be at a good level in cyber security in the near future.



Türkiye’de Yapılan Siber Güvenlik Faaliyetlerinin ve Eğitim Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Hüseyin ÇAKIR¹ , Murat TAŞER^{2,*} 

¹Gazi University Faculty of Education, Department of Computer Education and Instructional Technology, Yenimahalle/ANKARA

²Pamukkale University Hospitals, Chief Directorate, Pamukkale/DENİZLİ

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 22/08/2022
Düzeltilme: 08/10/2022
Kabul: 25/10/2022

Anahtar Kelimeler

Siber Güvenlik
Siber Hukuk
Siber Saldırı
Siber Suç
Kritik Altyapılar

Öz

Araştırmada, Türkiye’de siber güvenlik alanındaki son yirmi yılda yapılan çalışmaların derlenmesi, siber güvenlik strateji ve politikalarının incelenmesi ve elde edilen sonuçlar ile artı ve eksi tarafların belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmanın amacı çerçevesinde, 2001 yılından günümüze siber güvenlik alanında yayımlanmış kitaplar, Ulusal tez merkezi, Sobiad, Turcademy ve Dergipark’ta yayımlanan tez, dergi ve makaleler ile Türkiye’nin Siber Güvenlik Strateji ve Politikaları incelenmiştir. Çalışmada akademik alanda hangi üniversitelerde siber güvenlik bölümlerinin kurulduğu ve hangi programlarda eğitim öğretim faaliyetinde bulunduğu da değerlendirilmiştir. Ayrıca siber saldırılardan en çok etkilenen kurumlar, Türkiye’de siber güvenlik alanında öncü kurum ve kuruluşlara değinilmiş ve bunların politikaları üzerinde durulmuştur. Yine Türkiye’de eksikliği hissedilen önemli konulardan birisi olan siber güvenliğin mevzuatı boyutu ele alınmış, siber güvenlikle alakalı Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi üzerinden Kanunlar ve Yönetmelikler incelenmiştir. Son olarak elde edilen önemli sonuçlar, kişisel olarak siber güvenlik alanında yapılması gerekenler ve Türkiye’de siber güvenlik alanındaki tehditler değerlendirilmiştir. Çalışma siber güvenlik alanındaki eksikliklerin tespit edilmesi açısından önemli bir çalışma olmuştur.

Evaluation of Cyber Security Activities and Training Studies in Turkey

Article Info

Review article
Received: 22/08/2022
Revision: 08/10/2022
Accepted: 25/10/2022

Keywords

Cyber Security
Cyber Law
Cyber Attacks
Cyber Crimes
Critical Infrastructures

Abstract

In the research, it is aimed to compile the studies conducted in the last twenty years in the field of cyber security in Turkey, to examine the cyber security strategies and policies, and to determine the positive and negative sides with the results obtained. Within the scope of the research, the books published in the field of cyber security since 2001, the theses in the national thesis center, the articles published in Sobiad, Turcademy and Dergipark, and Türkiye’s Cyber Security Strategies and Policies were examined. In the study, it was also mentioned in which universities cyber security departments were established in the academic field and in which programs they were engaged in education and training activities. In addition, the institutions most affected by cyberattacks, the leading institutions and organizations in the field of cyber security in Türkiye were mentioned and their policies were emphasized. Again, the legal dimension of cyber security, which is one of the important issues that are felt to be lacking in Türkiye, has been discussed, and Laws and Regulations related to cyber security have been examined through the Presidential Legislation Information System. Finally, the important results, what needs to be done personally in the field of cyber security and threats in the field of cyber security in Turkey were evaluated. The study has been an important study in terms of detecting the deficiencies in the field of cyber security.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte hayatın her alanı gittikçe daha kolay hale gelmektedir. Ancak teknoloji doğru kullanıldığında kişilerin hayatını kolaylaştırdığı gibi yanlış kullanıldığında da zarar verebilmektedir. İnsanlar bu olumsuz etkilere maruz kalmamak ve kişisel güvenliklerini sağlamak

adına alışlagelmiş yöntemlerin de ötesinde veri güvenliği tedbirlerine ihtiyaç duyar hale gelmişlerdir. Kişisel verilerin koruma altına alınması ise siber ortamı tanımakla mümkündür [1].

Dijitalleşen dünyada her geçen gün yeni bir gelişmenin duyurulması, internet kullanımının farklı ortamlarda fazlalaşmasıyla, teknolojinin

önemi bir kat daha artmıştır. Bireylerin güvenilir ve doğru olmayan teknolojileri bilinçsiz kullanımı, siber suçları gün geçtikçe çoğaltmış, siber güvenlik, siber dünya, siber güç, siber uzay ve kişisel bilgi güvenliği gibi kavramların önemini artırmıştır [2].

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte her alanda internet kullanan fakat veri güvenliği konusunda yeterli bilgisi olmayan bilinçsiz bir toplum yetişmektedir. İnsanlar farkında olmadan, teknolojik aletler vasıtasıyla suç işlemeye veya suç oluşturacak unsurlar meydana getirmeye başlamıştır. Sürekli gelişen siber güvenlik ve siber suçlar konularında paralelinde yasal düzenlemelerinde geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle siber ortamda işlenen suçların niteliği ve hangi alanlarda kişiye yaptırım yapılabileceği konularının üzerinde daha çok çalışılması gerekmektedir. Bunun için de bu zamana kadar yapılan yasal düzenlemelerin artıları ve eksilerinin ortaya konulması önemlidir [3].

Konuya ulusal güvenlik açısından bakıldığında, siber caydırıcılık ve siber suçların artarak devam etmesi ülkelerin karşı strateji geliştirme gereksinimini doğurmuştur. Siber güvenlik alanında strateji geliştirme ve ihtiyaç duyulan çalışmaların yapılması açısından Türkiye'nin diğer ülkelere göre hangi aşamada olduğu ve bu noktada yaşanan ulusal sorunların belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca siber güvenlik alanında kurum ve kuruluşların aldıkları önlemlerin ne olduğu, daha çok hangi kurumların etkilenebileceği ortaya konulmalıdır. Akademik anlamda üniversitelerin farkındalık yaratmak adına ne gibi çalışmalar yapması gerektiği de tespit edilmelidir.

Araştırmada, Türkiye'de akademik olarak şimdiye kadar siber güvenlik alanında yapılan çalışmaların yanı sıra gelecek dönem siber güvenlik stratejileri ve politikaları planlamalarına dair çalışmalar da incelenmiştir. Araştırma, bu konuyla alakalı daha önce yayınlananlardan farklı olarak, yayımlanan tüm çalışmaların derlenmesi açısından önem arz etmektedir. Çalışmada öncelikli olarak bazı önemli kavramların tanımları ele alınmıştır.

1.1. Siber Güvenlik (Cyber Security)

Siber güvenlik, siber saldırılara ve uluslararası tehditlere karşı savunma sistemlerinin geliştirilmesidir. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı siber güvenlik kavramını, "Siber uzayı oluşturan bilişim sistemlerinin saldırılardan korunmasını, bu ortamda işlenen bilgi/verinin gizlilik, bütünlük ve erişilebilirliğinin güvence altına alınmasını, saldırıların ve siber güvenlik olaylarının tespit edilmesini, bu tespitlere karşı tepki mekanizmalarının devreye alınmasını ve

sonrasında ise sistemlerin yaşanan siber güvenlik olayı öncesi durumlarına geri döndürülmesi" olarak tanımlamıştır [4].

Siber ortamda oluşan saldırılar bazen ulusal siber güvenliği tehdit edebilmektedir. Geçmişte yüz yüze yapılan savaş artık yerini dijitalleşen ve kodlar üzerinden yapılan saldırılara bırakmıştır. Siber saldırılarda ilk hedef alınan yerler ise kritik altyapılardır. Kişisel veriler de dâhil olmak üzere bilginin gizliliğinin, bütünlüğünün veya erişilebilirliğinin bozulması durumunda; ekonomik zarar oluşmasına, kritik tesislerin işlevlerini yerine getirmesini engellenmesine, kamu düzenini bozulmasına veya can kaybına yol açılmasına sebebiyet veren bilişim altyapı sistemlerine kritik altyapılar denir. Ulusal siber güvenliğin sağlanması ve kritik altyapıların korunması ülkelerin ana görevlerinden biri haline gelmiştir. Bu yüzden son yıllarda uluslararası düzeyde siber güvenlik çalışmalarına ağırlık verilmektedir [5].

Türkiye'de siber güvenlik alanında yapılan çalışmalar ise henüz yeterli seviyede değildir. Bu durum 2020 yılı için Türkiye'nin siber güvenlik alanında ulusal siber güvenlik indeksinde 45. sırada olmasından anlaşılmaktadır [6]. Bu da Türkiye'nin bu konuda birçok ülkenin gerisinde kaldığını göstermektedir. Araştırmada kurumların siber güvenlik alanındaki çalışmaları incelenmiş ve yeterlilikleri sorgulanmıştır. Ek olarak Türkiye'de siber güvenlik alanında yayınlanmış akademik çalışmaların incelenmesi ve eksikliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Araştırma bu anlamda eksik olan alanların tespit edilmesi adına önemli bir çalışmadır. Konuyla ilgili incelemelere geçmeden önce aşağıda siber güvenlik alanındaki tehditler hakkında bilgi verilmiştir.

1.2. Siber Suç ve Geçmişten Günümüze Suç Türleri (Cybercrime and Types of Crime from Past to Present)

Bilgisayar, cep telefonu, kredi kartı gibi gündelik yaşamda sıklıkla kullanılan araçlarla da işlenebildiği için geniş bir alana yayılan siber suçların, niteliğini ve sınırlarını belirlemek zor olmaktadır. Bu yüzden siber suçlara dair literatürde birçok tanım bulunmaktadır [7]. Siber suç kavramı, global elektronik ağlar aracılığıyla yürütülen yasa dışı olan veya belirli bir tarafça kabul edilen bilgisayar faaliyetleri" olarak açıklanırken, aynı zamanda sosyal normları ve kuralları ihlal eden yasa dışı eylemler, sapkınlıklar ve sakıncalı eylemler olarak da karşımıza çıkmaktadır [8].

Wall'a göre siber suçlar; izinsiz giriş yapma şeklinde (Virüs), aldatma ve hırsızlık yoluyla (kredi kartı dolandırıcılığı), cinsel bir materyalle (porno ve

müstehcenlik) ve bireylere zarar verme yoluyla (zorbalık, terör ve taciz) olmak üzere dörde ayrılmıştır [9]. Tablo1’de detayları verilen bir başka

çalışmada, siber suçlar şu şekilde tanımlanmıştır [10]:

Tablo 1. Siber suç türleri (Types of cybercrime)

Suç Türü	Tanımı
Dolandırıcılık	Kişisel fayda ve kazanç için izinsiz, yetkisiz olarak çıktıkları değiştirmek, yok etmek, kötüye kullanmak, verileri değiştirmek.
Hırsızlık	Veri ve yazılım hırsızlığı.
Lisanssız yazılım kullanımı	Kopya yazılım, korsan yazılım.
Siber Terörizm	Sanal ortamda teröre yönlendirmek.
Özel iş	Menfaat için bilgi işlemleri izinsiz kullanmak.
Kişisel verilerin kötüye kullanımı	Resmi olmayan kayıtları bilgisayar ortamında kişisel çıkar amaçlı kullanım.
Hacklemek	Yetkisiz erişimle bilgisayar sistemini ele geçirmek
Sabotaj	Kasıtlı olarak bilgisayara zarar vermek.
Pornografi	İzinsiz indirilen pornografik verilerin tanıtılması.
Casusluk	Kişisel verileri çevrim içi yollarla elde edip kişisel bilgisayarlara saldırmak.
Virüs	Bilgisayar sistemini bozmak için yapılan zararlı yazılım.
Çevrim içi hizmet reddi	Çevrim içi bilgisayara zarar vermek için e-posta göndermek virüslerle bilgisayarın kullanılması.

Ulusal Beyaz Yaka Suçları Merkezinin 2013 yılı raporunda siber suç olarak altıya ayrılmıştır:

- Sosyal zorbalık (Cyber-Bullying),
- İnternet sahtekârlığı (Internet Fraud),
- Siber takip (Cyberstalking),
- Sosyal medyanın suç amaçlı kullanımı (Criminal use of Social Media),
- Sağlık hizmet dolandırıcılığı (Healthcare Fraud),
- Kara para aklama (Money Laundering).

ABD doktrininde on iki siber suç türüyle en kapsamlı sınıflandırma yapılmıştır. Bunlar; hizmetlere veya verilere karşı işlenen hırsızlıklar, mülkiyete karşı hırsızlıklar, maddi hırsızlıklar, bankamatik kartı hırsızlıkları, manyetik kart şifre eylemleri, giriş ihlalleri, insan hatalarından kaynaklanan ihlaller, veri sahtekârlığı, evrak sahtekârlığı, sır ihlalleri, sabotaj ve gasp olarak tanımlanmıştır [11].

Bilişim Suçları Türk Ceza Kanununda ise şu şekilde belirtilmiştir: Bilişim sistemine hukuka aykırı olarak girme, kalmaya devam etme ve veri nakli yapma, sistemi engelleme, bozma, verileri

değiştirme ya da yok etme, banka veya kredi kartlarının kötüye kullanma [12].

1.3. Siber Saldırı Tanımı ve Örnekleri (Cyber Attack Definition and Examples)

Alkan siber saldırıyı “hedef seçilen şahıs, şirket, kurum, örgüt ve devlet gibi yapıların bilgi ve iletişim sistemlerine ve kritik altyapılarına yapılan planlı ve koordineli saldırılar” olarak tanımlamıştır [13]. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığına göre ise siber saldırı; “Ulusal siber uzayda bulunan bilişim sistemlerinin gizlilik, bütünlük veya erişilebilirliğini ortadan kaldırmak amacıyla, siber uzayın herhangi bir yerindeki kişi ve/veya bilişim sistemleri tarafından kasıtlı olarak yapılan işlemler” olarak tanımlanmıştır [4].

Siber saldırılar sadece bilgisayar sistemine sızma, zarar verme ve bilgi çalma şeklinde olmamaktadır. Aynı zamanda kritik askeri, haberleşme, enerji ve ulaşım sistemlerine zarar verme/ele geçirme yöntemleriyle asimetric ve hibrit bir savaş haline gelmiştir. Günümüzde artan bu saldırılar, yakın geçmişten itibaren devletler tarafından da kabul edilmeye başlanmıştır. Bununla ilgili yapılan akademik çalışmaların son yıllarda giderek arttığı

gözlendirilmektedir. Gerek özel ve gerek kamu kuruluşları olmak üzere farkındalık eğitimleri verilmeye ve bu konuda deneyimli personeller yetiştirilmeye devam edilmektedir. Eylül 2016'da yapılan toplantıda Türkiye'nin dört yıllık süreçte nasıl bir siber güvenlik çalışması yapacağı, 2016-2019 Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı ile beş ana eylem altında kırk bir alt eylem ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, siber güvenliğin ulusal güvenlikle aynı olduğu, siber uzayda yer alan teknolojilere karşı önlemler alınması ve etkinliklerin artırılması kararı alınmıştır.

Siber saldırı yöntemlerini, internet üzerinden saldırı yoluyla, donanım/yazılım hataları oluşturma yoluyla ve kritik ağ sistemlerine erişim yoluyla olmak üzere üç ana başlıkta toplamak mümkündür. Bilinen diğer yöntemler kısaca şunlardır [2]:

- Veri dolandırıcılığı (Data Diddling),
- Yanlış veri girişi, kritik verilerin veya kayıtların değiştirilmesi,
- Salam tekniği (Salami Techniques): Bankacılıkta küsuratlı rakamların başka bankaya aktarılması,
- Süper darbe (Super Zapping): Ağ kullanıcılarının şifrelerini çalma yöntemiyle normal güvenlik denetimlerini devre dışı bırakacak kadar ayrıcalıklara sahip olmak,
- Truva atı (Causus Yazılımlar): Arka kapılar kullanarak sisteme erişmek, keylogger gibi programlarla şifrelere, klavye verilerine, kişisel verilere erişmek,
- Zararlı yazılımlar,
- Mantık Bombaları (Logic Bombs): Program içerisine zararlı kod ekleyip sistemi veya ağı çökertmek veya kullanılmaz hale getirmek,
- Oltalama (Phishing): Sahte web sitesinden alışveriş yapılması sonucu kredi kartı bilgilerini ele geçirmek,
- Bukalemun (Chameleon): Zararsız gibi görünen programlarla bilgisayardaki tüm gizli dosyaları ve şifreleri ele geçirmek,
- İstem dışı elektronik posta (Spam): Web sayfalarından elde edilen bilgilerle alıcılara ticari amaçlı istenmeyen e-posta göndermek,
- Çöpe dalma (Scavenging): Sistemdeki silinmiş bilgileri geri getirmek,
- Yerine geçme (Masquerading): Hileyle erişim yetkisi olan birinin yerine geçmek,
- Sistemi kırmak (Hacking),
- Sosyal mühendislik: Kişilerin güvenini kazanarak bilgi toplamak teknikleridir.

Siber saldırıları yapan saldırganlar üç ayrı sınıfta değerlendirilir. Bunlardan ilki amatörlerdir. İnternette hazır kalıplar ve kodlardan derlemeler

yaparak, işletim sistemlerine saldırılar yaparlar. Bu tarz saldırganlar başlangıçta kendilerini başarılı gibi gösterebilir de hedef bilgisayar veya işletim sistemi hakkında bilgi sahibi değillerdir. Her ne kadar bilgisiz ve donanımsız saldırılar yapsalar da korunmasız bir bilgisayar sistemi üzerinde kalıcı etkiler bırakabilirler. İkincisi; siber korsan olarak da bilinen beyaz, gri ve siyah şapkalı olarak tanımlanan hackerlardır. Hackerlar yeterli bilgiye sahiptir ve istediklerinde çok ciddi zararlara yol açabilirler. Kurum ve kuruluşlar, sistemlerine zarar vermeye çalışan bu tarz hackerlara karşı sistem açıklarını bulan kişilere maddi ödüller vermektedir. Üçüncüsü organize gruplardır. Hedef alınan devletin düşmanları tarafından desteklenirler. Bu siber suçlular, organize bir şekilde bir araya gelerek bilgileri manipüle etmeyi, kurumlara ciddi zararlar vermeyi, istihbarat toplamayı ve sabotaj yapmayı amaçlarlar. İyi eğitimlidirler ve sadece belli hedeflere odaklanırlar. Amacı belli olmayan saldırılara girişmezler [14]. Özellikle üçüncü olarak sayılan organize grupların düzenlediği saldırılar, bazen ülkelerin ulusal güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Ülkelerin bu konuyla ilgili özel olarak kurulmuş/görevlendirilmiş, sürekli denetim ve gözetleme faaliyetlerinde bulunan, acil eylem planları oluşturulmuş kurumlarının bulunması gerekmektedir. Konunun önemini daha iyi anlaşılabilmesi için Türkiye'de gerçekleşen siber saldırılardan bazıları aşağıda verilmiştir:

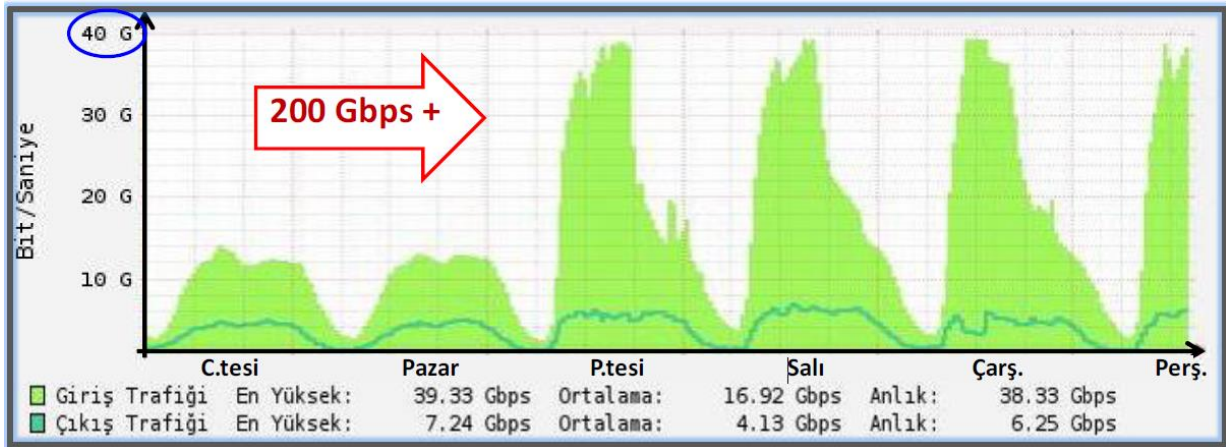
2008 yılında kritik tesislerden Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattına siber saldırı

5 Ağustos 2008 tarihinde petrol boru hattında meydana gelen patlamada sabotaj yapılmasından şüphelenilmesi üzerine çalışma yapılmış ve araştırma sonucunda olayın teknik bir arızadan kaynaklandığı duyurulmuştur. Patlama sosyal medyada da siber saldırı olarak anılmıştır. Saldırganların güvenlik kameralarını kullanarak sisteme bağlandığı, boru hattı güvenlik sistemine Windows alarm düzenini değiştiren kötücül yazılım yerleştirerek saldırıyı gerçekleştirdikleri iddia edilmiştir. Alarm çalışmadan basınç artırılıp boru patlatılmıştır. Patlama zamanı ve 60 saat güvenlik kamerası görüntüleri silinmiştir. Patlamanın neden olduğu anlaşılınca sinyal karıştırıcı kullanılarak, kızılötesi olarak ağa bağlanılmıştır. Boru hattında yürüyen siyah üniformalı iki kişi görüntülenmiştir. Saldırının ülkemiz ekonomisine zararı 7,5 milyon dolar, şirket ve ortaklarına zararı 75 milyon dolar ve Azerbaycan'a maliyeti 1 milyar dolardan fazladır [15].

2011 yılı Telekomünikasyon İletişim Başkanlığı (TİB) saldırısı

5651 sayılı kanunun, internette temel hak ve özgürlükleri ihlal ettiğini savunan *Anonymous* adlı grup 09 Haziran 2011 tarihinde kurum sitesine saldırmış, erişimi engelleyerek devre dışı bırakmıştır. Siteye erişim ancak gece yarısından sonra sağlanabilmiştir. Kısıtlamaların kaldırılmasına yönelik bir saldırı olsa da kamuoyunda yer almıştır [16].

2015 – 2016 yılında internet saldırıları



Şekil 1. 12-17 Aralık 2015 tarihi ağ trafiği [16] (Network traffic on December 12-17, 2015)

2015 ülke genelinde elektrik kesintisi

Türkiye tarihinde ilk kez yaşanan bir başka olayda ülke genelinde elektrik kesintisi yaşanmıştır. 31 Mart 2015 tarihinde Türkiye genelinde elektrikler 10 saatten fazla kesilmiştir. Saat 10 sularında Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinin Ankara Gölbaşındaki ve Sakarya'daki ana ve yedek kontrol odalarındaki bilgisayarlar aynı anda alarm vermiştir. Kısa süre içinde Türkiye'nin elektrik frekans sistemi çökmüştür. Kesintinin ülkenin enterkonnekte sistemine yapılan siber saldırıdan kaynaklandığı öne sürülmüştür [17].

1.4. Araştırmanın Amacı (Purpose of the Research)

Yapılan araştırmalarda Türkiye'de siber güvenlik alanında yeterli sayıda çalışma olmadığı görülmüştür. Eksik noktaların belirlenmesi amacıyla çalışmaların nitelikleri ve özellikleri bakımından derleme yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Makalede Siber Güvenlik terimi çerçevesinde son yirmi yıldaki yapılan çalışmalar derlenerek, siber güvenlik strateji ve politikalarının incelenmesi ve elde edilen sonuçlar ile Türkiye'de siber güvenlik alanındaki çalışmaların artı ve eksi yönlerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın amacına ulaşmak için aşağıda belirtilen alt amaçlar izlenmiştir.

- Türkiye'de siber güvenlik alanında yer alan kurumlar ve çalışmaları nelerdir?

Saldırı “.tr” uzantılı siteler hedef alınarak 14-24 Aralık 2014 ve 12-17 Aralık 2015 tarihlerinde yapılmıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ve E-Devlet başta olmak üzere bankalar da dâhil birçok kamu kurumu sisteminde yavaşlama ve çökme sorunları oluşmuştur (Şekil 1). Saldırığı Türkiye'de birçok bilgisayarı ele geçirdiğini söyleyen *Anonymous* grubu üstlenmiştir.

- Siber güvenlik çerçevesinde yapılan yasal düzenlemeler nelerdir?
- Siber güvenlik alanında akademik eğitim faaliyetlerine yönelik çalışmalar nelerdir?
- Türkiye'de yüksek lisans ve doktora seviyesinde siber güvenlik alanında yapılan tez çalışmaları nelerdir? Hangi konular üzerinde çalışılmıştır?
- Siber güvenlik alanında yazılmış olan kitap çalışmaları ve konuları nelerdir?

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Türkiye'de siber güvenlik önemi yeni anlaşılmaya başlanan bir kavramdır. Siber suç, siber saldırı, siber hukuk ve siber uzay gibi konuların işlendiği alandaki akademik çalışmalar son zamanlarda giderek artmaktadır. Kurum ve kuruluşlarda da siber güvenlik konusunda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Alan yazı incelendiğinde, yeterli çalışma olmadığı, gelişmekte olan bir alan olduğu görülmektedir. Siber güvenlik alanında ilgili yayınlara ulaşılırken, yayımlanmış kitaplar, Ulusal tez merkezi, Sobiad, Turcademy ve Dergipark'ta yayımlanan tez, dergi ve makaleler incelenmiştir. Literatür incelemesinde Siber Saldırı, Siber Savaş, Siber Güvenlik, Siber Suç, Siber Terör ve Siber Uzay anahtar kelimeleri doğrultusunda YÖK Ulusal Tez Merkezinden, 2004 yılından 2021 yılına kadar yayımlanan 104 Yüksek Lisans Tezi ve 9 Doktora

Tezine ulaşılmıştır. Araştırmada bazı tezler ulaşılamamıştır. Bu tezler istihbarat açısından güvenlik sebebiyle gizlenen Harp Akademisi araştırmalarıdır. Araştırmaya katkıda bulunabilecek çalışmalar aşağıda belirtilen hususlarda önem arz ettiği için ayrıntılı olarak incelenmiştir:

- Kamu ve özel kurumlar açısından kritik altyapıların önemi [18],
- Siber güvenliğin altyapı sorunları, ulusal güvenliğin sağlanması konusundaki zorluklar, kritik altyapıların önemi ve kamu politikalarının siber güvenliğe etkisi [19],
- Ulusal siber güvenlik stratejisi ve politikalarının oluşturulması noktasında kişi, kurum ve kuruluşlara yol gösteren bir kaynak olması [16],

- Siber güvenliğin hukuki altyapısı, eksiklikleri ve gereklilikleri [3],
- İletişim çağı ile gelen internetin etkileri, sosyal mühendislik kavramları ve bilişimin gücü [20],
- İşletmelerin ve kurumların teknoloji ile birlikte istihdam sorunları ve siber güvenlik altyapıları [21],
- NATO ülkeleri siber güvenlik stratejileri ve alınan önlemler [22],
- Covid 19 etkisi ve stratejinin sınırlılıkları [23],
- Sosyal medyada siber suç farkındalık düzeyinin ölçülmesi [24].

Tablo 2. Çalışma kapsamında incelenen yayınlar (Publications examined within the scope of the study)

Sıra	Konu	Türü	Sayı
1	Siber Güvenlik		42
2	Siber Saldırı		7
3	Siber Savaş	Tez, Makale,	5
4	Siber Suç	Dergi	35
5	Siber Terör		7
6	Siber Uzay		16
7	Türkiye'nin Siber Güvenlik Stratejisi	Belge ve Planlar	12
8	Siber Güvenlik ve Suçlar	Kanun	16
9	Siber Güvenlik, Ağ Güvenliği	Kitap	55
Toplam			195

Ek olarak 2001 yılından 2021 yılına kadar 20 yıllık süreçte siber güvenlik alanında 55 adet basılmış kitap incelenmiştir. Ayrıca ulusal siber güvenlik konusyla ilgili olabilecek yayımlanmış stratejiler, dokümanlar ve raporlar araştırılarak 12 adet çalışmaya ulaşılmıştır. Akademik olarak hangi üniversitelerde ve programlarda siber güvenlik bölümlerinin kurulduğu ve eğitim öğretim faaliyetinde bulunduğu araştırılmıştır. Ek olarak Türkiye'de siber güvenlik alanında öncü olan ve/veya siber saldırılardan en çok etkilenen kurumlara değinilmiş ve bunların politikaları üzerinde durulmuştur. En önemli konulardan birisi de siber güvenliğin mevzuatı boyutudur. Çalışmada Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi üzerinden Türkiye'deki şimdiye kadar düzenlenmiş siber güvenlikle alakalı çok sayıda Kanun ve Yönetmelik incelenmiştir. Son olarak tez, makale, dergi, kitap, strateji ve politikalarda

elde edilen önemli sonuçlar, kişisel olarak siber güvenlik alanında yapılması gerekenler ve Türkiye'de siber güvenlik alanındaki tehditler değerlendirilerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Türkiye'de Siber Güvenlik Alanında Yer Alan Kurumlar ve Çalışmaları (Institutions in the Field of Cyber Security in Türkiye and Their Studies)

Siber güvenlik ve siber suçlar alanında yürütülen asayiş ve hukuk çalışmaları tek başına yeterli olmamıştır. Bu konularda çalışan birçok kurum olmakla birlikte aynı zamanda alanında uzman ve çözüm üretebilecek kurum ve kuruluşların varlığına da ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçtan dolayı özellikle ulusal güvenliğin sağlanması amacıyla güvenilir yerli yazılım ve donanımlarla çalışan çeşitli kurum ve kuruluşlar kurulmuştur.

Tablo 3. Siber güvenlik alanında çalışma yapan kurumlar (Organizations working in the field of cyber security)

İstihbarat Çalışmaları	Kritik Altyapı Çalışmaları	Özel Girişimler
Emniyet Genel Müdürlüğü Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı	BTK	Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. (STM)
Jandarma Genel Komutanlığı Bilişim ve Teknik İstihbarat Başkanlığı	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)	Hava Elektronik Sanayi (HAVELSAN)
Siber Güvenlik Komutanlığı İstihbarat Daire Başkanlığı	TÜBİTAK	Askeri Elektronik Sanayi (ASELSAN)
Siber Suçlarla Mücadele Şube Müdürlüğü	Milli İstihbarat Teşkilatı (MİT)	
Milli İstihbarat Teşkilatı (MİT)	Türk Silahlı Kuvvetleri Siber Savunma Komutanlığı	

3.1.1. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu

(Information and Communications Technologies Authority)

Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) 4502 sayılı kanun ile “Telekomünikasyon Kurumu” adıyla 27 Ocak 2000 tarihinde kurulmuştur. Daha sonra adı “Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu” olarak değiştirilmiştir. Siber suçlarla mücadele bu kurum tarafından sivil toplum kurum ve kuruluşlarıyla iş birliği halinde yürütülmektedir. Türkiye’nin ilk sektör düzenleyici kurumu olan BTK, telekomünikasyon sektörünü denetlemektedir. Türkiye’de siber güvenlik noktasında ana omurgayı BTK oluşturmaktadır [25].

Kurum kurulduğu günden bugüne kadar sektöre yön veren, önemli Stratejik Planlar belirlemiştir. 2010-2012 Stratejik Planı ile IPv6’ya geçiş süreci, E-Devlet uygulamalarının artırılması, Teknoparkların kurulması, Elektronik ve mobil imza kullanım alanlarının genişletilmesi, tüketicilerin bilgilendirilmesi kapsamında kurum internet sayfalarının genişletilmesi, tüketici şikâyetlerinin dinlenmesi ve çözüm üretilmesi gibi önemli kararlar alınmış ve uygulanmıştır.

2013-2015 Stratejik Planı ile Ulusal siber güvenliğin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması, kayıtlı elektronik posta düzenlemelerinin güncellenmesi ve hizmet sağlayıcılarının denetlenmesi, ihtiyaç duyulan alanlarda yeni düzenlemeler yapılması, yeni nesil şebekelere geçiş sürecinin tanımlanması ve uygulanması, spektrum serbestleşmesi, spektrum ticareti düzenlemelerinin tamamlanması ve uygulanması, altyapıya dayalı rekabetin desteklenmesi yönünde düzenlemeler yapılması kararları alınmıştır.

2016-2018 Stratejik Planı ile Şebeke yatırımları ve rekabetin desteklenmesi, tüketici memnuniyetinin

sağlanmasının teşvik edilmesi, elektronik haberleşme güvenliği ve siber güvenlik konularında yetkinliğin artırılması, e-dönüşüm sürecinin desteklenmesi, alan adı tahsisinde etkinliğin artırılması, uluslararası gelişmelerin takip edilerek Türkiye’ye yönelik çalışmalar yapılması gibi kararlar alınmıştır.

2019-2023 Stratejik Planı ile güvenlik temelli Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi, bilgi teknolojileri ve internetin bilinçli kullanımı konusunda farkındalık faaliyetlerinin yürütülmesi, internetin bilinçli kullanımı için oluşturulan teknik araçların etkinliğinin sağlanması, yasal olmayan internet içeriği ile mücadele edilmesi, siber güvenliğe yönelik uzman insan gücünün nicelik ve niteliğinin artırılması, ulusal siber güvenliğin sağlanması için ihtiyaç duyulan denetleme ve düzenleme faaliyetlerinin sürdürülmesi gibi siber güvenliği ilgilendiren önemli kararlar alınmıştır [26].

3.1.2. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

(Scientific and Technological Research Council of Turkey)

Kuruluş amacı; “Türkiye’de müspet bilimlerde araştırma ve geliştirme faaliyetlerini ülke kalkınmasındaki önceliklere göre geliştirmek, özendirmek, düzenlemek ve koordine etmek; mevcut bilimsel ve teknik bilgilere erişmek ve erişilmesini sağlamak” olarak belirlenen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), bu amaç doğrultusunda Ulusal Siber Güvenlik konusunda çalışmalar yapmak üzere Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Araştırmalar Merkezinin (BİLGEM) bünyesinde 1997 yılında bir laboratuvar kurmuştur. Burada Microsoft/açık kaynak kodlu işletim sistemleri, e-posta sunucuları, aktif ağ cihazları, veri tabanları ve saldırı tespit sistemleri gibi savunma ürünleri hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır. Genelkurmay

Başkanlığı'nın desteğiyle 2001 yılında kurulan Ortak Kriter Merkezi, bilişim sistemi ürünlerinin güvenlik kriterlerini ve seviyelerini incelemiş, kripto cihazlar için Haberleşme Güvenliği testleri yapmıştır. 2006 yılından sonra akıllı kart güvenliği üzerine Yan Kanal Analizi ve Tersine Mühendislik konularında uzmanlaşan kurum, altyapısıyla dünyada önemli test merkezlerinden biri haline gelmiştir [27].

2005 yılında Bilgi Sistemleri Güvenlik Programı ile kamu kurum ve kuruluşlarının ihtiyaçlarını karşılamak için TÜBİTAK BİLGEM Ağ Güvenliği kurulmuştur. Burada kritik kamu kurum personellerine ve üniversitelerin bilişim sistemlerinde çalışan görevlilere eğitimler verilmiştir. Yine TÜBİTAK BİLGEM bünyesinde kurulan Siber Güvenlik Enstitüsü ise kritik altyapıların akıllı sistemler karşısında güvensiz hale gelmesinden dolayı Türkiye genelindeki enerji, su, haberleşme, finans gibi kritik altyapıların korunması yönünde güvenlik testleri yapmıştır. Bilişim sistemlerinin güvenliği konusunda çalışmalar devam etmektedir.

Bugüne kadar üç adet ulusal siber güvenlik tatbikatı gerçekleştirilmiştir. İlki 2008 yılında, ikincisi 2011 yılında, Üçüncüsü ise 2013 yılında gerçekleştirilmiştir [27]. Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve 2013-2014 Eylem Planı ile kritik altyapı tesislerinin korunması ve güvenli yazılımlarının geliştirilmesi görevi TÜBİTAK'a verilmiştir. Siber güvenlik ürünleri ve hizmet sağlayıcılarının sertifikalandırılması da Türk Standartları Enstitüsü ile birlikte TÜBİTAK sorumluluğuna verilmiştir.

3.1.3. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (Disaster and Emergency Management Presidency)

Siber güvenlik alanında çalışma yapan kurumlardan birisi de 17 Haziran 2009'da kurulan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)'dır. Her ilde valiye bağlı olarak çalışan AFAD, Eylül 2014'te 2014-2023 Kritik Altyapıların Korunması Yol Haritasını yayımlamıştır. Güvenlik irtibat görevlisinin atanması, eğitim programının oluşturulması ve uygulanması, Kritik Altyapı Koruma Planının hazırlanması, AB Kritik Altyapı Uyarı Bilgi Ağı çalışmalarına destek verilmesi ve yetkili otoritelerin belirlenmesi bu yol haritasında belirlenen gereksinimlerdir. Fakat belgede olası bir siber güvenlik krizinin nasıl yönetileceğine açıklık getirilmemiştir [28].

AFAD'ın önemli görevleri vardır. Bilhassa kritik altyapıların korunması, ilgili kurumlar arasında koordinasyonun sağlanması ve altyapılara yönelik ihtiyaç duyulan verilerin hazırlanması görevinin

AFAD tarafından yürütülmesi önem arz etmektedir [29]. Kurumun siber güvenlik konusunda çalışmaları, Bilgi Sistemleri ve Daire Başkanlığı tarafından yürütülmektedir.

3.1.4. Ulusal Siber Olaylara Müdahale Merkezi (Computer Emergency Response Team)

28447 sayılı "Ulusal Siber Güvenlik Çalışmalarının Yürütülmesi, Yönetilmesi ve Koordinasyonuna İlişkin Bakanlar Kurulu Kararı" ve 5809 sayılı "Elektronik Haberleşme Kanunu" gereğince, 27.05.2013 tarihli Bakanlar Kurulu Kararıyla siber saldırı etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için BTK'ya bağlı olarak Ulusal Siber Olaylara Müdahale Merkezi (USOM) kurulmuştur. Bu merkezin görevleri aşağıda verilmiştir [30].

- Ülkemizdeki siber olaylara müdahale konusunda koordinasyon ve kontrol faaliyetlerini yürütmek,
- Tespit edilen siber tehditlerle ilgili olarak ülke çapında alarm, uyarı ve duyuru yapmak,
- Siber güvenlik olaylarına maruz kalan bilişim sistemlerine koruyucu tedbirler almak,
- Siber güvenlik çalışmalarında suç teşkil eden eylemlere karşı adli makamlar ve kolluk kuvvetleriyle koordine olarak hareket etmek,
- Yerli ve milli Siber Olaylara Müdahale Ekipleri (SOME) İletişim Platformu (SİP) üzerinden sektörel güvenlik bildirimlerini (alarm, duyuru, mesaj ve ihbar) göndermek,
- Zararlı internet adreslerini tespit etmek, zararlı yazılımları kontrol etmek, port taraması yapan internet adreslerinin erişimlerini engellemek,
- Siber tehditleri azaltmak ve bertaraf etmek,
- Özel kuruluşlar ile kamu kuruluşları arasında iş birliği yapmak ve farkındalığı artırmak,
- Ulusal ve uluslararası sivil, askeri güvenlik tatbikatlarına katılım sağlamaktır.

3.1.5. Siber Güvenlik Kurulu (Cyber Security Board)

2012/3842 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile "siber güvenlikle ilgili olarak alınacak önlemleri belirlemek, hazırlanan plan, program, rapor, usul, esas ve standartları onaylamak ve bunların uygulanmasını ve koordinasyonunu sağlamak amacıyla" Siber Güvenlik Kurulu kurulmuştur. Kurulun görevlerinden bazıları aşağıda verilmiştir [31]:

- Siber Güvenlik için ihtiyaç duyulan politika, strateji ve eylem planlarını hazırlamak.
- Kamu kurumlarının veri güvenliğini sağlamaya yönelik usul ve esasları hazırlamak.

- Siber Güvenlik için kamu kurumlarında ihtiyaç duyulan teknik altyapının oluşturulmasını, etkinliğini ve test edilmesini sağlamak.
- Ulusal iletişim altyapısı, sistemleri ve veri tabanlarının güvenliğini sağlamak.
- Kritik alt yapıya yönelik siber tehdit ve saldırıları izlemek, müdahale ve önleme sistemlerini oluşturmak.
- İhtiyaç duyulan merkezleri kurmak, bu sistemlerin denetimi, işletimi ve güçlendirilmesiyle ilgili çalışmalar yapmak.
- Siber Güvenliğin sağlanması adına milli çözümler ve siber saldırılara müdahale araçları geliştirmek.
- Ulusal Siber Güvenliğin sağlanması için uzman personel temini, eğitimi ve bu konuda diğer ülkeler ve uluslararası kuruluşlarla iş birliği yapmak.

3.1.6. Türk Silahlı Kuvvetleri Siber Savunma Komutanlığı (Turkish Armed Forces Cyber Defense Command)

Türkiye'nin ülkeyi dışardan gelecek siber saldırılara karşı korumak amacıyla oluşturulan ve Siber Savunma Komutanlığı olarak bilinen ilk siber ordu, Savunma Bakanlığı, TÜBİTAK ve ODTÜ iş birliği ile Genelkurmay Başkanlığı bünyesinde 2010 yılında kurulmuştur. 2013 yılında Ulusal Siber Güvenlik Stratejisinin yayınlanmasıyla resmileşerek görevleri tanımlanmıştır. Bu görevler şunlardır [1]:

- Türk Silahlı Kuvvetlerinin (TSK) siber ortamdaki tüm sistemlerinin siber savunmasını sağlamak.
- Siber olaylara 7/24 müdahale edecek şekilde hazır bulunmak.
- NATO tarafından veya ulusal olarak icra edilen tatbikatlara katılmak.
- Bilinçlendirme ve eğitim faaliyetleri yürütmek.
- Kurumun kullandığı ağlarda siber güvenlik denetlemeleri yapmak.

2014 yılında Siber Savunma Proje Tanımlama Dokümanı hazırlanmış ve Millî Savunma Bakanlığına sunulmuştur. TSK için milli yazılım ve donanım altyapısı sağlanmıştır. Kasım 2014'te NATO destekli Siber Koalisyon Tatbikatı yapılmıştır. 2020 yılı itibarıyla milli yazılımlar ve Siber Savunma Merkezi projeleriyle siber ordu güçlendirilmiştir.

3.1.7. Emniyet Genel Müdürlüğü Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı (General Directorate of Security, Department of Combating Cybercrime)

Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM) bünyesinde ilk olarak 1998'de Bilgisayar Suçları ve Bilgi

Güvenliği Kurulu kurulmuştur. Bu kurul bilişim suçlarının kapsamı, bilişim ve ağ teknolojileri hakkında bilgi sahibi olunması, ulusal ve uluslararası mevzuatın incelenmesi ve suç unsuru olabilecek faktörlerin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. Bu kuruldan bir yıl sonra Bilgi Suçları Çalışma Gurubu kurulmuştur.

2001 yılında ise siber suçlarla mücadele kapsamında Bilişim Suçlarıyla Mücadele Daire Başkanlığı kurulmuştur. 2003 yılında ismi değiştirilerek Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı olmuştur. 81 ilde şubesi olan bu başkanlık çok kapsamlı ve etkili bir şekilde çalışmalarına devam etmektedir.

Siberay, Ocak 2020'de Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı bünyesinde başlatılan bir projedir. Siber zorbalığı engellemek, teknoloji bağımlılığı konusunda çocukları ve gençleri bilinçlendirmek, güvenli internet kullanımını sağlamak projenin esas amaçlarıdır. Özellikle çocukları bilinçlendirmeyi hedef alan proje Emniyet Müdürlüğü Çocuk Şubesi uzman pedagoglarıyla çalışmaktadır. BTK, Gazi Üniversitesi, Milli Eğitim Bakanlığı Talim ve Terbiye Kurulu Başkanlığı ve İçişleri Bakanlığı'na bağlı çeşitli Daire Başkanlıkları projeye katkıda bulunan diğer kuruluşlardır.

3.2. Siber Güvenlik Faaliyetleri Çerçevesinde Yasal Düzenlemeler (Legal Regulations Within the Framework of Cyber Security Activities)

Dünya'da, teknolojinin hızlı gelişimiyle ve bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla siber suçlar cezasız kalmaya başlamıştır. Siber dünya yeni savaş alanı haline gelmiş ve devletler de bu yönde önlem almak zorunda kalmıştır. Türkiye'de de son yıllarda ulusal bir sorun haline gelen siber güvenlik saldırıları sonucunda, siber suçlar konusunda hukuksal olarak düzenleme yapılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Siber suçlar kısmında da değinilen onuncu kısım haricindeki Türk Ceza Kanununda yer alan ve bilgisayar yoluyla işlenen suçlar aşağıda verilmiştir [12]:

1-Kişisel Verilerin Kaydedilmesi Suçu (madde 135) "Hukuka aykırı olarak kişisel verileri kaydeden kimseye bir yıldan üç yıla kadar hapis cezası verilir."

2-Kişisel Verilerin Hukuka Aykırı Olarak Ele Geçirilmesi veya Verilmesi (madde 136) "Kişisel verileri, hukuka aykırı olarak bir başkasına veren, yayan veya ele geçiren kişi, iki yıldan dört yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılır."

3-Verilerin Yok Edilmesi Suçu (madde 138) "Kanunların belirlediği sürelerin geçmiş olmasına karşın verileri sistem içinde yok etmekle yükümlü

olanlara görevlerini yerine getirmediklerinde bir yıldan iki yıla kadar hapis cezası verilir.”,

4-Haberleşmenin Gizliliğini İhlal Suçu (madde 132) “Kişiler arasındaki haberleşmenin gizliliğini ihlal eden kimse, bir yıldan üç yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılır. Bu gizlilik ihlali haberleşme içeriklerinin kaydı suretiyle gerçekleşirse, verilecek ceza bir kat artırılır.”,

5-Haberleşmenin Engellenmesi (madde 124) “Kişiler arasındaki haberleşmenin hukuka aykırı olarak engellenmesi halinde, altı aydan iki yıla kadar hapis veya adli para cezasına hükmolunur.”,

6-Hakaret Suçu (madde 125) “Bir kimseye onur, şeref ve saygınlığını rencide edebilecek nitelikte somut bir fiil veya olgu isnat eden (...) veya sövmek suretiyle bir kimsenin onur, şeref ve saygınlığına saldıran kişi, üç aydan iki yıla kadar hapis veya adli para cezası ile cezalandırılır. Mağdurun gıyabında hakaretin cezalandırılabilmesi için fiilin en az üç kişiyle ihtilat ederek işlenmesi gerekir. Fiilin, mağduru muhatap alan sesli, yazılı veya görüntülü bir iletiyle işlenmesi halinde, yukarıdaki fıkrada belirtilen cezaya hükmolunur.”,

7-Bilişim Sistemi kullanılarak İşlenen Hırsızlık Suçu (madde 142/2/e) “*Bilişim sistemlerinin kullanılması suretiyle işlenmesi.*”,

8-Bilişim Sistemi kullanılarak İşlenen Dolandırıcılık Suçu (madde 158/1/f) “Bilişim sistemlerinin, banka veya kredi kurumlarının araç olarak kullanılması suretiyle işlenmesi.”,

9-Müstehcenlik Suçu (madde 226) “Bir çocuğa müstehcen görüntü, yazı veya sözleri içeren ürünleri veren ya da bunların içeriğini gösteren, okuyan, okutan veya dinleten, bunların içeriklerini çocukların girebileceği veya görebileceği yerlerde ya da alenen gösteren, görülebilecek şekilde sergileyen, okuyan, okutan, söyleyen, söyleten, bu ürünleri, içeriğine vakıf olunabilecek şekilde satışa veya kiraya arz eden, bu ürünleri, bunların satışına mahsus alışveriş yerleri dışında, satışa arz eden, satan veya kiraya veren, bu ürünleri, sair mal veya hizmet satışları yanında veya dolayısıyla bedelsiz olarak veren veya dağıtan, bu ürünlerin reklamını yapan kişi, altı aydan iki yıla kadar hapis ve adli para cezası ile cezalandırılır.”

Türk Ceza Kanunu dışında yapılan düzenlemelere ise aşağıda yer verilmiştir:

5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu Madde 2/1’in 7 Haziran 1995 tarihinde değişiklik yapılan hali “Herhangi bir şekilde dil ve yazı ile ifade olunan eserler ve her biçim altında ifade edilen bilgisayar programları ve bir sonraki aşamada program sonucu doğurması koşuluyla bunların

hazırlık tasarımları” şeklindedir [32]. Bu maddeyle bilgisayar programları, hazırlık aşamasında bilgisayar ara yüzünden erişilen bilgiler de eser olarak tanımlanmış, bunlara yönelik fiillerde suç olarak sayılmıştır.

5070 sayılı Elektronik İmza Kanunu Madde 17 “Tamamen veya kısmen sahte elektronik sertifika oluşturanlar veya geçerli olarak oluşturulan elektronik sertifikaları taklit veya tahrif edenler ile bu elektronik sertifikaları bilerek kullananlar, iki yıldan beş yıla kadar hapis ve yüz günden az olmamak üzere adli para cezasıyla cezalandırılır.” ile elektronik sertifikalar üzerinde yapılan değişiklikler de suç olarak kabul edilmiştir [33].

5651 sayılı kanun ile içerik sağlayıcının, yer sağlayıcının ve erişim sağlayıcının yükümlülükleri tanımlanmış ve işlenen suçlarla nasıl mücadele edilmesi gerektiği belirlenmiştir [34]. Madde 8/1’ de “*İnternet ortamında yapılan ve içeriği aşağıdaki suçları oluşturduğu hususunda yeterli şüphe sebebi bulunan yayınlarla ilgili olarak içeriğin çıkarılmasına ve/veya erişimin engellenmesine karar verilir.*” ifadesi yer almaktadır. Bahsedilen suçlar; uyuşturucu madde kullanılmasını kolaylaştırma, intihara yönlendirme, müstehcenlik, fuhuş, çocukların cinsel istismarı, kumar oynanması için yer ve imkân sağlama, sağlık için tehlikeli madde temini, Atatürk aleyhine işlenen suçlar kanunu ve Spor Müsabakaları bahis oyunları kanununda yer alan suçlardır.

Yukarıda belirtilen suçlar dışında mevzuatta değinilmesi gereken, siber suç kapsamına alınabilecek diğer hükümler ise aşağıda verilmiştir.

Kritik altyapıların korunmasına yönelik ihtiyaç duyulan hükümlere 1 nolu Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi’nde yer verilmiştir. Cumhurbaşkanlığı dijital dönüşüm ofisine sorumluluklar verilmiş; ofis, kritik altyapıların belirlenmesine ilişkin çalışmalar gerçekleştirmek, bilgi güvenliği yönetim sistemleri kurmak, işletmek ve teknik standartlara ilgili usul esasları konusunda yetkilendirilmiştir. Güvenlik ve Dış Politikalar Kurulu kararlarıyla da siber güvenlik politikaları konusunda strateji geliştirme görevi verilmiştir [35]. Ayrıca özel kanunlarda da internet aracılığıyla işlenebilen suçlara yer verilmektedir. İlgili mevzuat hükümleri şunlardır:

1632 sayılı Askeri Ceza Kanununa göre internet ve iletişim araçlarıyla işlenebilen birçok suç türü vardır. Kanunun 58. maddesine göre; “*Her kim, Türk Ceza Kanununun 153, 161 inci maddelerinde yazılı suçlardan birisini ve 155 inci maddede yazılı halkı askerlikten soğutmak yolunda neşriyatta ve telkinatta bulunmak ve nutuk irat etmek fiillerini işleyecek olursa milli mukavemeti kırmak*

cürmünden dolayı mezkur maddelerde gösterilen cezalarla cezalandırılır.” hükmünün yanı sıra emirlere ya da emirlere itaatsizliğe yönlendirmek veya güncel olarak incelendiğinde sosyal medya hesaplarından askeri bilgi ve belgelerin paylaşılması, fotoğraf ve konum paylaşımı ile yer tespit edilmesinin sağlanması internet yoluyla işlenebilen suçlar kapsamında yer alır [36].

2935 sayılı Olağanüstü Hal Kanunu ile güvenlik, asayiş ve kamu düzenini korumak kapsamında sınırlamalar getirme yetkisi il ve bölge valilerine verilmiştir. Kanununun 25.maddesi 2.bendinde yer alan şu hüküm *“Özel maksatla kamunun telaş ve heyecanını doğuracak şekilde asılsız, mübalağalı havadis ve haber yayan veya nakledenler, fiilleri başka bir suç oluştursa bile ayrıca üç aydan bir yıla kadar hapis ve beş bin liradan az olmamak üzere ağır para cezasıyla cezalandırılırlar. Eğer fiil, fail tarafından bir yabancı ile anlaşma sonucu işlenmiş ise hapis cezası bir yıldan ve ağır para cezası otuz bin liradan aşağı olamaz. Bu suçlar basın ve yayın organları vasıtasıyla işlenirse fail ve mesulleri hakkında verilecek cezalar bir misli artırılarak hükmolünür.”* ile internet üzerinden ve sosyal medya hesaplarından yalan haber yapan veya gerçeğe aykırı beyanda bulunan kişilerin de cezalandırılabilceği anlaşılmaktadır [37].

Ağır cezalar içeren 3713 sayılı Terörle Mücadele Kanunu 7. maddesinde yer alan *“...Terör örgütünün; cebir, şiddet veya tehdit içeren yöntemlerini meşru gösterecek veya övecek ya da bu yöntemlere başvurmayı teşvik edecek şekilde propagandasını yapan kişi, bir yıldan beş yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılır. Bu suçun basın ve yayın yolu ile işlenmesi hâlinde, verilecek ceza yarı oranında artırılır. Ayrıca, basın ve yayın organlarının suçun işlenmesine iştirak etmemiş olan yayın sorumluları hakkında da bin günden beş bin güne kadar adli para cezasına hükmolünür...”* hükmü, bireysel olarak sosyal medyada veya internette yayın yaparak suç unsuru oluşturan kişileri de kapsamaktadır [38].

5352 sayılı Adli Sicil Kanunu 11. maddesinde yer alan; *“Adli sicil ve arşiv bilgileri gizlidir. Bu bilgiler, görevlilerce açıklanamaz ve bu Kanun hükümlerine göre verilen kişi, kurum ve*

kuruluşlarca verilmiş amacı dışında kullanılamaz.” hükmü ile kişisel bilgilerin açıklanmaması gerektiği belirtilmektedir [39]. Son zamanlarda bu konular yüzünden özellikle kamu personelleri tarafından Cumhurbaşkanlığı İletişim Sistemine (CİMER) birçok başvuruda bulunduğu görülmektedir. Bilgisayar veya internet yoluyla bu bilgilerin paylaşılması veya kullanılması siber suçlar kapsamında değerlendirilebilir.

4125 sayılı seçimlere yönelik kanunda yer alan yayın yasaklarına uymamak hükmünün, bilgisayar veya internet yoluyla çiğnenmesi de yasaktır [40]. 3192 sayılı Bankacılık Kanununda bankanın itibarını zedeleyecek, şöhretine ya da servetine zarar verebilecek asılsız haber yaymanın internet ve bilgisayar yoluyla işlenmesi de suç kapsamına girmektedir [41].

6502 sayılı Tüketicilerin Korunması Kanuna göre internette reklam alan/verenlerin, Rekabet Kurulu ilkelerine, kamu düzenine, genel ahlaka, kişilik haklarına uygun, dürüst ve doğru olmaları, tüketiciyi aldatmamaları, yanıltıcı reklam vermemeleri gerekmektedir. Ayrıca kamu sağlığını bozacak, çocuk, hasta, yaşlı ve engellileri istismar edecek reklam ve ilanlar ile örtülü reklam yapılamaz hükmü yer almaktadır [42].

3.3. Siber Güvenlik Alanında Akademik Eğitim Faaliyetlerine Yönelik Çalışmalar (Studies on Academic Training Activities in the Field of Cyber Security)

Son yıllarda dünyada teknolojinin gelişmesiyle birlikte güvenlik zafiyetleri artmaktadır. Küreselleşen dünyada ülkemizin bu gelişen teknoloji ve değişimlere karşı ayak uydurması biraz zaman alsa da akademik anlamda farkındalık çalışmaları uzun yıllardır devam etmektedir.

Günümüzde 11’i Devlet Üniversitesi, 12’si Vakıf Üniversitesi olmak üzere toplam 23 üniversitede Siber Güvenlik bölümü açılmış olup akademik eğitime devam edilmektedir. Üniversiteler ve buralarda açılan bölümlere bakıldığında farklı olarak sadece Yıldız Teknik Üniversitesinin Siber Güvenlik ve Kriptografi Anabilim Dalı bölümü açtığı, diğer üniversitelerde Siber Güvenlik adı altında eğitime devam edildiği görülmektedir.

Tablo 4. Siber güvenlik eğitimi veren üniversiteler (Universities offering cyber security education)

Sıra	Üniversite Adı	Şehir	Bölüm Adı
1	Üsküdar Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
2	Kadir Has Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
3	Işık Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
4	Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Adana	Siber Güvenlik
5	Marmara Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
6	İstanbul Ticaret Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
7	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Ankara	Siber Güvenlik
8	Gebze Teknik Üniversitesi	Kocaeli	Siber Güvenlik
9	Antalya Bilim Üniversitesi	Antalya	Siber Güvenlik
10	Sabancı Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
11	Bahçeşehir Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
12	Koç Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
13	Düzce Üniversitesi	Düzce	Siber Güvenlik
14	Yıldız Teknik Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
15	Yıldız Teknik Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik ve Kriptografi
16	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Ankara	Siber Güvenlik
17	Hacettepe Üniversitesi	Ankara	Bilgi Güvenliği
18	Sakarya Üniversitesi	Sakarya	Siber Güvenlik
19	Milli Savunma Üniversitesi	Ankara	Siber Güvenlik
20	Süleyman Demirel Üniversitesi	Isparta	Siber Güvenlik
21	İstanbul Teknik Üniversitesi	İstanbul	Siber Güvenlik
22	Yaşar Üniversitesi	Ankara	Siber Güvenlik
23	Ahmet Yesevi Üniversitesi	Ankara	Siber Güvenlik

Siber güvenlik alanında açılan bölümlerin hangi düzeyde olduğu incelendiğinde ise iki üniversitede (Yaşar Üniversitesi, Marmara Üniversitesi) Anabilim dalı olarak bölüm açılmış olup Lisans eğitimi verilmektedir. Dokuz üniversitede Yüksek Lisans düzeyinde eğitim faaliyeti verilmekte, iki üniversitede (İstanbul Ticaret Üniversitesi, Kadir Has Üniversitesi) ise Doktora düzeyinde eğitim verilmektedir. Yüksek Lisans ve Doktora alanındaki eğitim veren üniversite bölümlerinin 20 tanesi Tezli olarak, 16 tanesi Tezsiz olarak öğrenci kabul etmekle birlikte 12 tanesi doğrudan Türkçe, 6 tanesi doğrudan İngilizce, 5 tanesi Türkçe-İngilizce öğrenci kabul etmektedir.

3.4. Türkiye’de Siber Güvenlik Alanında Yapılan Tez Çalışmaları (Thesis Studies on Cyber Security in Türkiye)

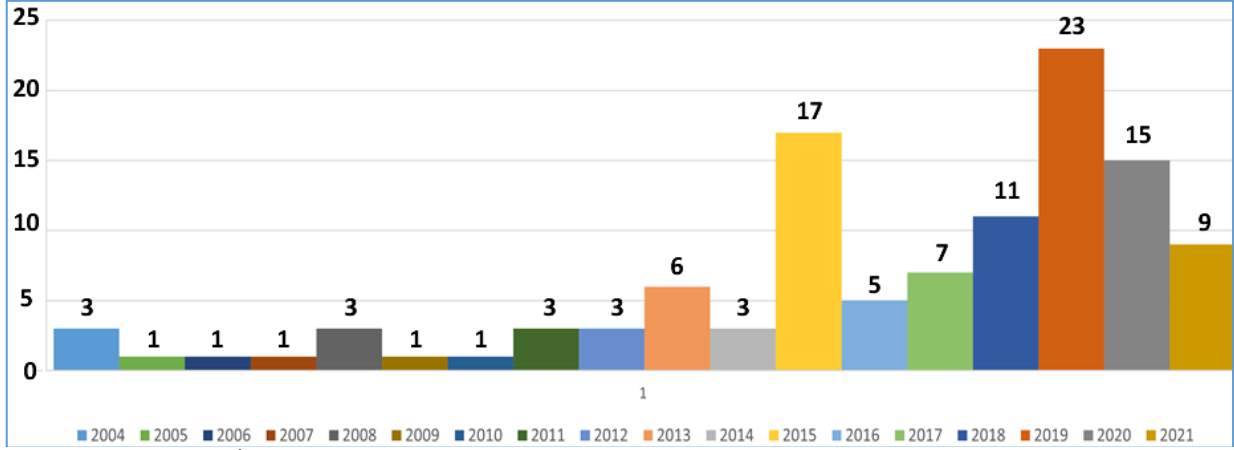
Çalışma kapsamında Türkiye’de siber güvenlik alanında yapılan tezler araştırılmıştır. YÖK Tezler sayfasından 2004 ve 2021 yılları arası ve aşağıda belirtilen anahtar kelimeler üzerinden yapılan aramalar neticesinde 113 teze ulaşılmıştır. Arama yapılan anahtar kelimeler Siber Güvenlik (Cyber Security), Siber Hukuk (Cyber Law), Siber Terör

(Cyber Terrorism), Siber Saldırı (Cyber Attacks), Siber Savaş (Cyber Attack), Siber Suç (Cyber Crimes), Siber Uzay (Cyber Space) şeklinde sıralanabilir.

Tezlerin 80 tanesinin (%71) devlet üniversitesi, 33 tanesinin (%29) ise vakıf üniversitesi bölümlerinde yayımlandığı tespit edilmiştir. Vakıf üniversitelerinin Siber Güvenlik alanında yaptığı çalışmalar çok olmasına karşın yayınlanan tez oranlarına bakıldığında devlet üniversiteleri bu konuda açık ara öndedir. Türkiye’de Siber Güvenlik alanında yayınlanan tezlerin %92 si (104 adet) Yüksek Lisans Tezi, %8 i (9 adet) Doktora Tezidir. Bu konu da Yüksek Lisans ile başlayıp giderek artan çalışmalar olduğunu ve Siber Güvenlik farkındalık çalışmalarının sonuç vermeye başladığını söylemek mümkündür. Türkiye’de Siber Güvenlik alanında incelenen tezlerin üniversitelere göre dağılımı incelendiğinde ise; 12 tez ile Gazi Üniversitesinin ilk sırada olduğu görülmektedir. İstanbul Bilgi Üniversitesi 6 tez, Marmara Üniversitesi ve İstanbul Üniversitesi 5 tez, Selçuk Üniversitesi ve Harp Akademisi Komutanlığı 4 tez, Erciyes Üniversitesi, Ankara Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi,

Polis Akademisi, Kara Harp Okulu Komutanlığı, Bahçeşehir Üniversitesi, Fırat Üniversitesi ve Hacettepe Üniversitesi 3 tez yayımlamıştır. Yayımlanan tezlerin 2004–2021 yılları arasında dağılımı incelendiğinde 2018 ve sonrasında ciddi bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle 2013 yılı ve öncesinde siber güvenlik, siber ortam, siber uzay

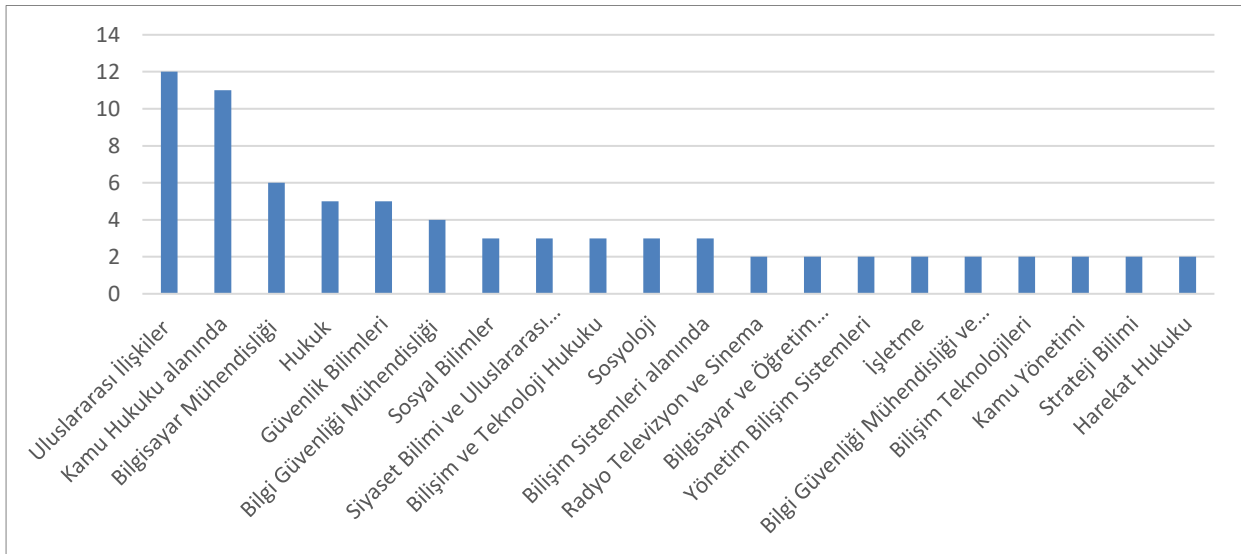
kavramlarının yeterli derecede incelenmediği görülmektedir. 2021 yılı tezleri Covid 19 pandemisi sebebiyle YÖK Ulusal Tez Merkezinde beklemede olduğu için bu tezlerin tamamına ulaşılamamıştır.



Şekil 2. İncelenen tezlerin yıllara göre dağılımı (Distribution of analyzed theses by years)

İlerleyen süreçte 2021 yılında yayımlanan tezlerde artış gözlemlenebilecektir. Tezlerin enstitülerine göre dağılımı incelendiğinde 57 tane Sosyal Bilimler Enstitüsü, 23 tane Fen Bilimleri Enstitüsü,

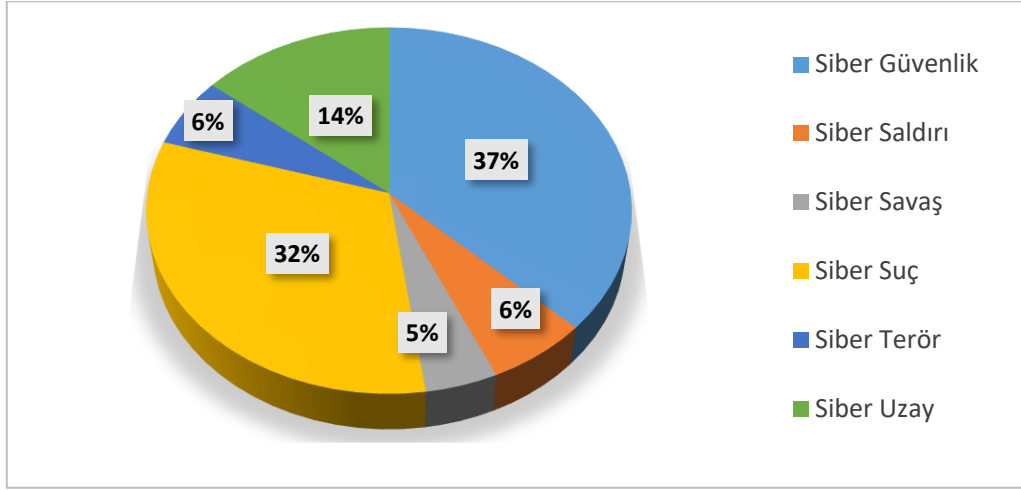
9 tane Bilişim Enstitüsü, 5 tane Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 4 tane Stratejik Araştırmalar Enstitüsü, üçer tane Güvenlik Bilimleri ve Savunma Bilimleri Enstitülerinde tez yayımlandığı görülmektedir.



Şekil 3. Tezlerin anabilim dalına göre dağılımı (Distribution of theses by department)

Anabilim Dalına göre incelendiğinde ise en fazla tez 12 adet ile Uluslararası İlişkiler alanında yayımlanmıştır. Kamu Hukuk'u alanında 11 tane, Bilgisayar Mühendisliği alanında 6 tane, Hukuk alanında 5 tane, Güvenlik Bilimleri ve Bilgi Güvenliği Mühendisliği alanında 4 tane, Sosyal Bilimler, Siyaset Bilimi ve Uluslararası İlişkiler,

Bilişim ve Teknoloji Hukuku, Sosyoloji, Bilişim Sistemleri alanlarında 3'er tane tez yayımlanmıştır. Tezler konularına göre sınıflandırıldığında ise en çok Siber Güvenlik alanında tez yazıldığı görülmektedir. Siber Suç tez yazımında çok tercih edilen diğer bir konudur.



Şekil 4. Tezlerin konularına göre dağılımı (Distribution of theses by subject)

Genel hatlarıyla tezlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

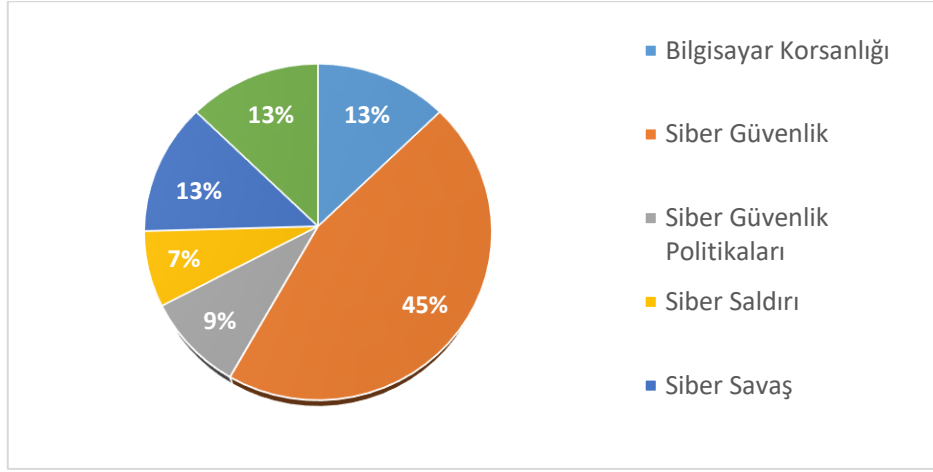
- Ulusal güvenlik ve milli değerlerin korunması için gelecekteki teknolojilere uyum sağlanması ve ihtiyaç duyulan konularda çözümler üretilmesi,
- Kurumların kendi bünyelerinde gerekli tedbirleri almaları ve ihtiyaç duyulan güvenlik kurallarını belirlemeleri gerektiği,
- En tehlikeli siber suçun interaktif dolandırıcılık olduğu,
- En az bilinen siber suç bot-net/DDoS saldırıları olduğu,
- Sanal bahis ve kumarın çok fazla arttığı,
- Siber suçlar konusunda eğitim seviyesinin yetersiz olduğu,
- Türkiye'nin gelişmiş ülkelere göre siber güvenlik alanında geri kaldığı,
- Siber suçların eğitim seviyesi ile aynı oranda arttığı,
- Kişisel güvenlik önlemlerinin siber saldırılar için yetersiz kaldığı,
- Cinsiyetin farkındalık açısından bir etkisinin olmadığı,
- Yazılım kullanma, sanal bahis ve DDoS saldırılarının siber suç olarak görülmediği fakat en tehlikeli suçlardan birisi olduğu,
- Türkiye'nin siber hukuk alanında mevzuatını güncellemede geri kaldığı,
- Türkiye'nin siber güvenlik eylem planlarını uygulamada geri kaldığı,
- Özel sektörler ile sağlanan siber orduların siber güvenliği destekleyemediği,
- Okullarda verilen eğitimlerde eski usullerin kullanılması ve öğrencilerin siber güvenliği

yanlış yerlerden, sosyal medyadan öğrenmesinin uygun olmadığı,

- Siber saldırıların şirket, kurum ve kuruluşlara son zamanlarda çok ciddi zararlar verdiği ve mevzuat hükümlerinin yetersizliğinden kişilerin yargılanamadığı,
- Türk hukuk sistemi bilişim suçlarının tasniflenmesinde eksiklikler olduğu,
- Gelişen teknolojiler ile siber uzayı daha çok hayatımızda hissedeceğimiz ve yakın gelecekte bu teknolojilerin olası zararlarının artacağı,
- Sosyal medya uygulamalarının mahremiyet kavramının ortadan kalkmasına ve kişisel bilgilerin kolaylıkla dolandırıcıların eline geçmesine yol açtığı,
- Kritik altyapılara yapılan siber saldırılara karşı yetersizlikler olduğu,
- Kurumların kendilerini güncellemede sorunlar yaşadığı,
- Gelişen akıllı ev, akıllı şehir teknolojilerinin olası etkileri,
- Siber güvenlik ile gelen siber terörün ülke açısından olası etkileri,
- Kablosuz ağ güvenliğinin farkındalığının yetersiz olduğu,
- Siber güvenlik politikalarının güncellenmesi gerektiği.

3.5. Siber Güvenlik Alanında Yazılmış Olan Kitaplar (Books Written on Cyber Security)

Türkiye'de Siber Güvenlik alanında yayımlanan kitaplar incelendiğinde toplamda 55 adet kitaba erişilmiştir. Siber Güvenlik alanında ülkemizde yayımlanan kitapların konusuna göre dağılımları Şekil 5' te verilmiştir:



Şekil 5. Kitapların konularına göre dağılımı (Distribution of books by subject)

Şekilden de görüleceği üzere yazılan kitaplarda en çok Siber Güvenlik konusu tercih edilmiştir. Siber Güvenlik konusunun genel anlamda anlatımını yapan kitapların yanı sıra savunma, politika, hukuk ve savaş boyutuna dair kitaplar da yayınlanmıştır. Tezlerde olduğu gibi kitaplarda da Siber Suç konusu Siber Güvenlikten sonra en çok tercih edilen konu

olmuştur. Kitapların yazıldığı yıllara göre dağılımları incelendiğinde ise 2019 yılına kadar düzenli bir artış yaşandığı görülmektedir. Çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda son yıllarda bu konuda yazılan kitap sayısında büyük bir artış yaşanmadığı görülmüştür.

Tablo 5. Siber güvenlik alanında yazılan kitaplar (Books written in the field of cyber security)

Sıra	Kitap Adı	Yıl
1	Siber İstihbarat	2001
2	Bilgisayar ve Ağ Üzerinden İşlenen Siber Suçlarla Mücadelenin Hukuksal ve Güvenlik Boyutu	2005
3	Siber Uzay'da Güvenlik ve Türkiye	2006
4	Avrupa Konseyi Siber Suçlar Sözleşmesi Taslağı	2006
5	Siber Suçların Cezalandırılması ve Türkiye'deki Durum	2008
6	Siber Uzayda Macera Dolu Bir Yolculuk	2008
7	Suç Terör ve Savaş Üçgeninde Siber Dünya	2009
8	Okul Zorbalığı ve Siber Zorbalık	2011
9	Siber Savaş Ulusal Güvenliğe Yönelik Yeni Tehdit	2011
10	Her Yönüyle Siber Savaş	2012
11	Türk Ceza Kanununda Bilişim Suçları	2012
12	Siber Güvenlik: Rapor	2012
13	Siber Güvenlik	2013
14	21.Yüzyılda Siber Güvenlik	2013
15	Siber Güvenlik: Rapor	2013
16	Güncel Tehdit Siber Suçlar	2014
17	Anonymous Hacker Dünyasının ve Küresel Siber Ayaklanmanın İç Yüzü	2014
18	Bilişim Suçları ve İnternet İletişim Hukuku	2014
19	Truva Atı Siber Kıyamet	2014
20	5. Uluslararası Bilgi ve Kriptoloji Konferansı: Siber Güvenlik ve Savunma: Bildiriler Kitabı	2014
21	Siber Güvenlik ve Elektronik Bileşenleri	2015
22	Siber Savaş ve Ulusal Güvenlik Stratejisi	2015
23	İnternet ve Gençlik İlişkisinin Bugünü ve Geleceği	2015
24	Siber Suçlar: Tehditler Farkındalık Mücadele	2015
25	Siber Güvenlik ve Siber Savaş	2015
26	Uygulamalarla Siber Güvenliğe Giriş	2015
27	Siber Savaş ve Ulusal Güvenlik Stratejisi	2015
28	Türkiye'de Siber Güvenlik ve Nükleer Enerji	2016
29	Avrupa Birliği'nin Siber Güvenlik Politikası	2017
30	Siber Ortamda Güvendeyim	2017
31	Geleceğin Endüstrileri: [Robotlar, Nesnelerin İnterneti, Genomlar, Büyük Veri, Dijital Para, Hassas Tarım, Siber Güvenlik]	2017
32	Siber Güvenlik ve Savunma: Farkındalık ve Caydırıcılık	2018
33	Siber Kırılma: Hacker El Kitabı	2018
34	Disiplinler arası Yaklaşımla Siber Politika & Siber Güvenlik	2018
35	Siber Güvenlik: -Hacking- Atölyesi	2018
36	Siber Güvenlik Bibliyografyası	2018
37	Siber Politika ve Siber Güvenlik	2018
38	APT ve Siber Saldırı Analizi	2019
39	Siber Güvenlik ve Savunma: Problemler ve Çözümler	2019
40	Herkes İçin Siber Güvenlik	2019
41	Mükemmel Silah: Siber Çağda Savaş, Sabotaj ve Korku	2019
42	Siber Güvenlik Operasyonları Merkezi: SGOM ve SOME'ler İçin Analiz, Tasarım, Kurulum ve İşletim Rehberi	2019
43	Siber Güvenlik: Saldırı & Savunma Stratejileri	2019
44	Siber Ortamda Güvendeyim	2019
45	Uygulamalı Siber Güvenlik ve Hacking	2019
46	Dijital Dönüşüm: Siber Güvenlik	2019
47	Siber Mücadeleye Giriş: <Guvende_Misin.V101/>	2019
48	Türkiye'nin Siber Güvenlik Politikalarının Kamu Politikası Analizi Çerçevesinde Değerlendirilmesi	2019
49	Siber Güvenlik ve Savunma: Standartlar ve Uygulamalar	2019
50	Siber Güvenlik Kapsamında Kültür ve Turizm Bakanlığında Bilgi Güvenliği ve Yol Haritası Önerisi	2019
51	Zararlı Yazılımlar: Siber Kitle İmha Silahları	2019
52	Ağ ve Yazılım Güvenliği	2020
53	Etik Hackerlığa Giriş 2	2020
54	Siber Casusluk: Siber Casusluk Yöntemleri ve Karşı Tedbirler	2021
55	Kablosuz Ağ Güvenliği	2021

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında yapılan siber suç araştırmalarından, dolandırıcılık, sahtekârlık, yasa dışı para toplama, müstehcenlik, pornografi, kamu malına zarar verme, zimmet, tehdit, komplo, teşebbüs ve terör benzeri suçların gerçek dünyada işlenebilen suçlar olduğu gibi sanal dünyada da rahatlıkla işlenebilen suç türleri olduğu görülmüştür. Siber suçlar kategorisine almak için bilgisayar veya internet ortamında işlenmesi yeterlidir. İnternet üzerinden işlenen suçları bağımsız bir kategori yapmak uygun değildir.

Siber güvenlik alanında en büyük zafiyetlerden bir tanesi ortak internet kullanımı ve wi-fi paylaşımlarıdır. Kontrol altına alınmadığı sürece işletme sahiplerine yasal sorumluluklar yüklenmesi kaçınılmazdır. Örneğin; bir kafede oturan müşteri, işletmenin wi-fi şifresini öğrenip bir kamu kurum ve kuruluşunun sitesine sızıntı yaparak ciddi bir zarar verebilir, bunun sonucunda ağa sızmaya çalışan kişi arandığında o kafenin işletme sahibi üzerine kayıtlı wi-fi sayesinde işletme sahibi bu suçtan sorumlu tutulabilir. Bu yüzden kullanılan wi-fi denetlenebilir olmalıdır.

Yapılan çalışmalar, günümüzde siber saldırılarda en çok kullanılan yöntemlerden birinin de sosyal mühendislik yöntemi olduğunu göstermektedir. Bu yöntemle kişilerden sohbet veya ikna yoluyla bilgileri öğrenilmekte, başka bir alanda bu bilgiler kullanılarak kişiler mağdur edilmektedir. Bu tarz saldırılardan korunmak için ise aşağıdaki basit yöntemler izlenebilir:

- Güvenlik duvarını sürekli açık tutmak,
- Anti virüs ve anti spyware yazılımı kullanmak,
- İşletim sistemini ve tarayıcıyı açıklara karşı sürekli güncel tutmak,
- Tüm bilgisayar ve ağ sistemini şifreli kullanmak,
- Kablosuz ağları şifreli ve gerekirse Mac filtreli kullanmak,
- Parolaların korunması için güçlü bir şifreleme yapmak,
- Verileri sürekli yedekleyip güncel tutmak,
- İki faktörlü doğrulama yapmak,
- Sosyal medyada az veri paylaşımı yapmak,
- E-posta ve tarayıcıyı özel veriler paylaşırken gizli modda kullanmak.

Araştırma sonuçları göstermektedir ki bir kurumu veya kuruluşu tam olarak siber saldırılara karşı korumak mümkün değildir. Güvenliği sürekli güncel tutarak, sistemli bir şekilde önlemler alarak, çalışmalara devam edilmelidir. Teknik ekip her zaman saldırılara karşı hazır durumda bulunmalıdır.

Her ne kadar çok güvenlik önlemleri alınsa da iyi hazırlanmış, planlı ve zamanlı bir siber saldırı her zaman başarılı olacaktır. Siber saldırılar yoluyla erişilen kişisel bilgiler sayesinde kurum veya kuruluşun itibarı zedeleneceği gibi, erişimin engellenmesi sonucu maddi zararlarda oluşabilir. Bazı siber saldırılar tamamen keyfidir. Saldırganlar, kurumlardan maddi bir çıkar veya veri beklentisinde olmayıp kendilerini geliştirmeyi amaçlamaktadırlar.

Türk Ceza Kanununda siber güvenlik faaliyetlerinin yasal düzenlemeleri kapsamında birçok madde bulunmaktadır. Hukuksal açıdan incelediğimizde siber güvenliğin ve siber suçların mevzuat yönünün yeterince irdelenmemesinin ve yapılan çalışmalarda yetersizliklerin, siber saldırılar, tehditler ve siber suçlara karşı net bir siber hukuk sistemi kurulamamasına yol açtığı görülmüştür. Bu açık yüzünden adalet ve ceza sisteminde de aksaklıklar yaşandığı görülmektedir. Bununla beraber kanuni düzenlemelerde sürekli değişiklikler ve güncellemeler yapılarak bilgisayar ve ağ sistemleri üzerinde işlenebilen bütün suçlar siber güvenlik alanına dâhil edilmeye başlanmıştır.

Türkiye’de elektronik haberleşme sahaları, enerji santralleri, su santralleri, ulaşım hizmetleri, bankacılık ve finans hizmetleri ile süreklilik göstermesi gereken bazı kritik hizmetler veren kamu kurumlarının kritik altyapı tesisleri olarak belirlenerek siber güvenlik çalışmalarında yer alması gerektiği görülmektedir. Siber güvenlik sisteminin takibi için personel yetersizliği sorunun çözülmesi gerekmektedir. Emniyet Genel Müdürlüğü ve Jandarma Genel Komutanlığında siber soruşturma alanında ihtiyaç duyulan personel alımlarının hızla yapılarak, siber suçlar ile daha iyi başa çıkılacağı düşünülmektedir. Ar-Ge laboratuvarları kurulması, proje teşviki ile kamu, özel kuruluşlar ve üniversite bilişim uzmanlarının faaliyetlerde bulunmaları önündeki yetersizlikler hakkında da acil çalışmalar yapılmalıdır.

Türkiye’nin siber güvenlik çalışmaları incelendiğinde 1990’lı yılların sonunda yapılan yasal düzenlemeler sonrasında siber suçlarla nasıl mücadele edileceği konusunda temel bir altyapı oluşturulduğu görülmektedir. Devamında teknolojinin hızla artması ile zafiyetlerin oluşmaması için kısmi önlemler alınmaya çalışıldığı görülmüştür. Yapılan çalışmaların yetersizliği 2000’li yıllarda daha net anlaşılmış ve bu kapsamda 2012 yılında “Siber Güvenlik Kurulu” kurularak ciddi önlemler alınmaya başlanmıştır. Türkiye’nin 2012 yılında oluşturulan Siber Güvenlik Organizasyonu ve Yol Haritasının beş ana başlık etrafında toplandığı görülmektedir. Bunlar; Siber

Güvenlik Kurulu kurulması, yasal düzenlemeler yapılması, altyapısının güçlendirilmesi, yeteneklerin geliştirilmesi ve ulusal iş birliğinin sağlanmasıdır. 2013 yılında Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve 2013-2014 Eylem Planı kabul edilerek siber güvenlik alanında ilklere imza atıldığı görülmüştür. Resmi ve özel güvenlik alanında yapılan çalışmalarda eksikliklere bakıldığında tam bir sistematik bilgi paylaşımı olmaması, yerli ve milli yazılımların kullanışlı olmaması gibi sorunlar olduğu görülmektedir.

Siber güvenlik donanım ürünleri incelendiğinde, kullanılan yazılımdan kaynaklanan kod hatalarının olması, işletim sistemi hatalarının olması, güncelleme olmaması gibi güvenlik açıklarının güvenlik zafiyetlerine sebebiyet verdiği görülmektedir. Ayrıca henüz büyük bir saldırının olmamış olması yüzünden şirketlerin ucuz maliyet için genelde görünürde kaliteli ama donanımsal olarak eksikliklerle dolu ucuz güvenlik donanımlarını tercih ettikleri görülmüştür. Yakın bir gelecekte büyük şirketler saldırıların hedefi olduğunda konunun önemi, iyi bir yolla olmasa da daha iyi anlaşılabilir.

Yapılan araştırmalar neticesinde siber güvenlik çalışmalarının ülkeler açısından ne kadar zaruri olduğunun yeni farkına varıldığı ve farkındalık eğitimlerinin artmaya başladığı görülmektedir. Türkiye’de siber güvenlik farkındalığının geliştirilmesi için akademik anlamda eğitim çalışmaları yapan kurumların Yüksek Lisans, Doktora Programlarının yanı sıra BTK ve Udemy gibi kurumların siber güvenlik eğitimleri verdikleri görülmüştür. Ayrıca bu kurum ve kuruluşların toplumda bilinç oluşturmak adına afiş, dergi, gazete, kamu spotu gibi farklı alanlarda reklamlar yayımladıkları görülmüştür.

Sonuç olarak günümüzde gelişen teknolojiler ve yapılan çalışmalar Türkiye’de siber güvenlik alanında farkındalığı üst seviyelere taşımıştır. Özellikle son zamanlarda yapılan akademik yayınların sayısı giderek artmaktadır. Bununla birlikte yerli ve milli yazılımların çoğalması, ASELSAN başta olmak üzere STM gibi şirketlerin donanımsal ve yazılımsal ürünler ortaya çıkarması, yakın gelecekte siber güvenlik konusunda Türkiye’nin iyi bir seviyede olacağını düşündürmektedir.

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)

H.Ç. ve M.T. çalışmanın derlenmesi ve yazımını birlikte yapmışlardır. Ayrıca yazarlar makalenin tamamını tartışmış ve son halini onaylamışlardır.

H.Ç. and M.T. compiled and wrote the manuscript together. The authors also discussed and approved the final version 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] Bıçakçı, S., Ergun, F. D. ve Çelikpala, M. (2015). Türkiye’de siber güvenlik. Ekonomi ve Dış Politika Araştırma Merkezi (EDAM) Siber Politika Kâğıtları Serisi, 1, 1-35.
- [2] Aslay, F. (2017). Siber Saldırı Yöntemleri ve Türkiye’nin Siber Güvenlik Mevcut Durum Analizi. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 24-28.
- [3] Alioğlu, S. D. (2019). Siber Saldırıları ve Ülkelerin Siber Güvenlik Politikaları (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Bilgi Üniversitesi.
- [4] Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2016). 2016-2019 Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi. Ankara: Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.
- [5] Ak, T. (2019). İç Güvenlik Yönetimi Açısından Kritik Altyapıların Korunması. ASSAM Dergisi, 97-131.
- [6] Düveroğlu, E. (2020). A Comparative Analysis Of Critical Infrastructure Cyber Security Policies: Best Practices From The Us, Eu And Turkey (Yüksek Lisans Tezi). Ankara: Bilkent Üniversitesi.
- [7] Gedik, D. (2018). Siber Güvenlik ve Terörizmin Evrilişi: Türkiye Üzerine Etkiler (Yüksek Lisans Tezi). Düzce: Düzce Üniversitesi.
- [8] Thomas, D. & Loader, B. (2000). Cybercrime: Law Enforcement. London.
- [9] Wall, D. (2001). Cybercrimes and the Internet. in D. Wall (Ed.). Crime and the Internet / London: Routledge.
- [10] Furnell, S. (2002). Cybercrime: Vandalizing The Information Society. London: Addison-Wesley.

- [11] Avşar, B. Z. ve Öngören, G. (2010). Bilişim Hukuku. İstanbul: Türkiye Bankalar Birliği.
- [12] Türk Ceza Kanunu (2004). Resmi Gazete (Sayı: 25611). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5237.pdf>.
- [13] Alkan, M. (2012). Siber Güvenlik ve Siber Savaşlar. TBMM İnternet Komisyonu (s. Siber Güvenlik Siber Savaşlar). Ankara: <https://meclishaber.tbmm.gov.tr>.
- [14] Taner, C. (2019). Herkes için Siber Güvenlik. İstanbul: Abaküs Yayınları.
- [15] Kurt, S. ve Erinç, M. B. (2021). PKK Tarafından Enerji Nakil Hatlarına Yönelik Olarak Gerçekleştirilen Saldırıların Türkiye'nin Enerji Güvenliğine Etkileri. Uluslararası İlişkiler Çalışmaları Dergisi, 1(1), 1-27.
- [16] Şenol, M. (2020). Türkiye'nin Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Politikalarının Oluşturulması Çerçevesinde Caydırıcılık (Doktora Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [17] Kurtoğlu, Ramazan, (2017). Küresel Para Oyunları ve Psiko-Siber Savaş, İstanbul: Destek Yayınları.
- [18] Güngör, M. (2015). Ulusal Bilgi Güvenliği: Strateji ve Kurumsal Yapılanma (Uzmanlık Tezi). Ankara: Bilgi Toplumu İdaresi Başkanlığı Yayını.
- [19] Göçoğlu, V. (2018). Türkiye'nin Siber Güvenlik Politikalarının Kamu Politikası Analizi Çerçevesinde Değerlendirilmesi (Doktora Tezi). Ankara: Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [20] Barışkan, M. A. (2017). Türkiye'deki Siber Güvenlik Bilinci ve Sosyal Mühendislik Ataklarına Karşı Savunma Önlemlerinin Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- [21] Korkusuz, A. (2020). Kurumlarda Siber Güvenlik ve Siber Riskler (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Bahçeşehir Üniversitesi.
- [22] Akyazı, U. (2016). Uluslararası Siber Güvenlik Strateji ve Doktrinleri Kapsamında Alınabilecek Tedbirler. 6.Uluslararası Siber Güvenlik ve Kriptoloji Konferansı. Ankara: <http://www.iscturkey.org/assets/files/2016/03/2013-paper105.pdf>.
- [23] Akdağ, İ. (2021). Siber Güvenlik ve Türkiye: Örgütsel Yapı, Uygulamalar ve Gelecek (Doktora Tezi). Ankara: Hacettepe Üniversitesi.
- [24] Arpacı, I. ve Aslan, O. (2022). Development of a scale to measure cybercrime-awareness on social media. Journal of Computer Information Systems, 1-11.
- [25] Darıcılı, A. B. (2019). Türkiye'nin Siber Güvenlik Politikalarının Analizi; Türkiye'nin Potansiyel Siber Güvenlik Stratejisi. TESAM Akademik Dergisi, 11-33.
- [26] Btk (2021). Stratejik Planlar. <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/yayinlar-stratejik-planlar/bilgi-teknolojileri-ve-iletisim-kurumu-2019-2023-stratejik-plani-published-revised-at-27-05-19.pdf> adresinden alındı.
- [27] Tübitak Bilgem. (2021). Siber Güvenlik Enstitüsü. <https://sge.bilgem.tubitak.gov.tr/tr/kurumsal/sge-tarihcesi> adresinden alındı.
- [28] Bıçakçı, S. (2019). Siber Güvenlik ve Savunma. Güvenlik Portalı: <https://trguvenlikportali.com/arastirma2/guvenlik-yazilari/> adresinden alındı.
- [29] Demirci, K. (2021). Kritik Altyapılarda Siber Güvenlik ve AFAD Üzerinden Bir Değerlendirme. Nazilli İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2(2), s. 54-64.
- [30] Usom. (2021). Usom görevleri. <https://www.usom.gov.tr/hakkimizda> adresinden alındı.
- [31] Ulusal Siber Güvenlik Çalışmalarının Yürütülmesi, Yönetilmesi ve Koordinasyonuna İlişkin Karar. (2012, 20 Ekim). Resmi Gazete (Sayı:2012/3842). Erişim adresi: <https://www.resmi-gazete.gov.tr/eskiler/2012/10/20121020-18-1.pdf>.
- [32] Fikir ve Sanat Eserleri (1951, 13 Aralık). Resmi Gazete (Sayı: 7981). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.3.5846.pdf>.
- [33] Elektronik İmza Kanunu (2004, 23 Ocak). Resmi Gazete (Sayı: 25355). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.5070.pdf>.
- [34] İnternet Ortamında Yapılan Yayınların Düzenlenmesi Ve Bu Yayınlar Yoluyla İşlenen Suçlarla Mücadele Edilmesi Hakkında Kanun. (2007, 4 Mayıs). Resmi Gazete (Sayı: 26530). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5651.pdf>.
- [35] Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi (2018, 10 Temmuz). Resmî Gazete (Sayı: 30474). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/19.5.1.pdf>.
- [36] Askeri Ceza Kanunu (1930, 15 Haziran). Resmî Gazete (Sayı: 1520). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.3.1632.pdf>.
- [37] Olağanüstü Hal Kanunu (1983, 27 Ekim). Resmi Gazete (Sayı: 18204). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.2935.pdf>.
- [38] Terörle Mücadele Kanunu (1991, 12 Nisan). Resmi Gazete (Sayı: 20843 (Mükerrer)). Erişim adresi: <http://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.3713.pdf>.

- [39] Adli Sicil Kanunu (2005, 1 Haziran). Resmî Gazete (Sayı: 25832). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5352.pdf>.
- [40] Seçimlerin Temel Hükümleri ve Seçmen Kütükleri Hakkında Kanun ile Siyasi Partiler Kanunu ve Milletvekili Seçimi Kanununda Değişiklik Yapılmasına İlişkin Kanun (1995, 28 Ekim). Resmi Gazete (Sayı: 22447 (Mükerrer)). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.4125.doc>.
- [41] Bankacılık Kanunu (2005, 1 Kasım). Resmî Gazete (Sayı: 25983 (Mükerrer)). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5411.pdf>.
- [42] Tüketicilerin Korunması Kanunu (2013, 28 Kasım). Resmi Gazete (Sayı: 28835). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.6502.pdf>.

Application of Statistical Quality Control Methods in a Textile Manufacturing Company

Ömer Faruk YILMAZ^{1*} 

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Trabzon, Turkey

Article Info

Research article
Received: 19/12/2022
Revision: 01/04/2023
Accepted: 04/04/2023

Keywords

Statistical Quality Control
Control Charts
Single Acceptance Sampling
Operating Characteristic
Curve

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/12/2022
Düzeltilme: 01/04/2023
Kabul: 04/04/2023

Anahtar Kelimeler

İstatistiksel Kalite Kontrol
Kontrol Grafikleri
Tek Katlı Kabul Örnekleme
İşletim Karakteristiği Eğrisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, statistical quality control (SQC) method is used to improve the standards of a textile company. The company's data are analyzed and SQC methods is determined to for quality control system. U chart is used to determine the limits for fabrics and to detect the deviations from mean. / Bu çalışmada bir tekstil firmasının standartlarını geliştirmek amacıyla istatistiksel kalite kontrol (İKK) yöntemine başvurulmuştur. Firmanın örnek kumaş kalite kontrol verileri analiz edilerek kullanılan kalite kontrol sisteminin iyileştirilmesi amacıyla uygun İKK yöntemleri belirlenmiştir. Tedarikçilerin ürettiği kumaşların kalite sınırlarını tespit etmek ve ortalamadan kaymaları tespit etmek amacıyla U kontrol grafiği kullanılmıştır.

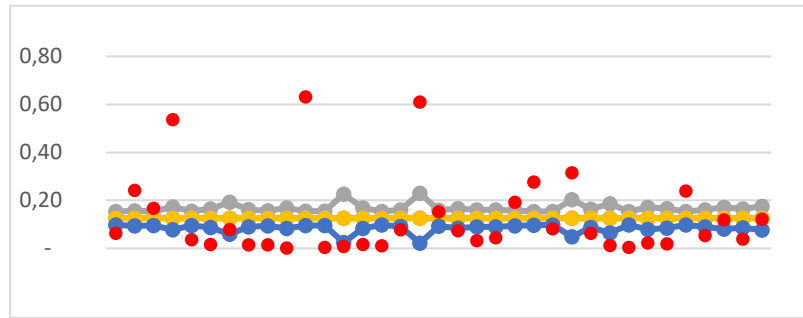


Figure 1: T1 U Control Chart / Şekil 1: T1 U Kontrol Grafiği

Highlights (Önemli noktalar)

- Statistical quality control method is employed. / İstatistiksel kalite kontrol yöntemi uygulanmıştır.
- MIL-STD 105 D is used for acceptance sampling. / MIL-STD 105 D örnekleme tablosundan yararlanılmıştır.
- İstatistiksel kalite kontrol uygulamaları standartların geliştirilmesine katkı sunmaktadır. / Application of statistical quality control methods contributes improving the standards.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the use of statistical quality control tools to improve quality standards in enterprises. / Bu çalışmanın amacı işletmelerde kalite standartlarının iyileştirilmesi için istatistiksel kalite kontrol araçlarının kullanımının araştırılmasıdır.

Originality (Özgünlük): In this study, U control chart is proposed instead of the quality assessment tool used in a textile company and its application is carried out. / Bu çalışmada bir tekstil firmasında kullanılan kalite değerlendirme aracı yerine U kontrol şeması önerilmiş ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): U control charts can be successfully applied in monitoring and evaluation of processes related to fabrics in textile enterprises. / Tekstil işletmelerinde kumaşlarla ilgili süreçlerin izlenmesinde ve değerlendirmelerde bulunulmasında U kontrol şemaları başarıyla uygulanabilmektedir.

Conclusion (Sonuç): Suppliers need quality improvement practice and as a result of statistical quality control efforts, it is possible to reach high quality standards in enterprises. / Tedarikçilerin kalite iyileştirme çalışmalarına ihtiyaçları bulunmaktadır ve istatistiksel kalite kontrol çalışmalarının gerçekleştirilmesi sonucunda işletmelerde yüksek kalite standartlarına ulaşılması mümkün olacaktır.



İstatistiksel Kalite Kontrol Metotlarının Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması

Ömer Faruk YILMAZ^{1*}

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Trabzon, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/12/2022
Düzeltilme: 01/04/2023
Kabul: 04/04/2023

Anahtar Kelimeler

İstatistiksel Kalite Kontrol
Kontrol Grafikleri
Tek Katlı Kabul Örnekleme
İşletim Karakteristiği Eğrisi

Öz

İstatistiksel kalite kontrol (İKK), işletmelerin süreçlerini izleyebilmesi ve bu sayede standartlarını koruyabilmeleri için kullanılan etkin bir yöntemdir. Bu çalışmada ele alınan tekstil firmasının kalite standartlarını artırmak amacıyla bu yöntemle başvurulmuş ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Firmanın geçmiş yıla ait örme kumaş kalite kontrol verileri analiz edilerek halihazırda kullanılan kalite kontrol sisteminin iyileştirilmesi amacıyla uygun istatistiksel kalite kontrol (İKK) yöntemleri belirlenmiştir. Tedarikçilerin ürettiği kumaşların kalite sınırlarını tespit etmek ve ortalamadan kaymaları tespit etmek amacıyla U kontrol grafiği kullanılmıştır. Firmanın, tedarikçiden gelen örme kumaş partilerine uygulamış olduğu kabul örnekleme yönteminin standartlaştırılması amacıyla tek katlı kabul planı oluşturulmuştur. Tek katlı kabul planı oluşturulurken MIL-STD 105 D Örnekleme Tablosu'ndan yararlanılmıştır. Örnekleme planı için işletim karakteristiği (İK Eğrisi) oluşturularak değişik kusurlu oranlarındaki partilerin kabul ihtimalleri incelenmiştir. Sonuçlarda yer verildiği üzere, tedarikçilerin kalite iyileştirme çalışmalarına ihtiyaçları bulunmaktadır ve bu çalışmaların gerçekleştirilmesi sonucunda işletmede yüksek kalite düzeylerine ulaşılması mümkün olacaktır.

Application of Statistical Quality Control Methods in a Textile Manufacturing Company

Article Info

Research article
Received: 19/12/2022
Revision: 01/04/2023
Accepted: 04/04/2023

Keywords

Statistical Quality Control
Control Charts
Single Acceptance Sampling
Operating Characteristic
Curve

Abstract

Statistical quality control is an effective method employed to increase the finished product quality of enterprises, and this method is used to increase the quality standards of the textile company presented in this study. The company's knitted fabric quality control data of the previous years are analyzed, and appropriate statistical quality control methods are determined to improve the quality control system currently used. U control chart is considered to assess the quality limits of the fabrics received from the suppliers. A single acceptance sampling plan is structured to standardize the acceptance sampling method applied by the company to the knitted fabric lots. MIL-STD 105 D military standard is considered while creating a single acceptance sampling plan. The operating characteristic (OC Curve) for the sampling plan is designed and the acceptance probabilities of the lots with different defective rates are examined. As stated in the computational results, suppliers need quality improvement efforts and followed by that it would be possible to reach high quality levels in the enterprise.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rekabetin yoğun şekilde hissedildiği günümüz üretim ortamlarında, tüketici ihtiyaçlarına belirlenen spesifikasyonlarda cevap verebilmek için tekstil işletmelerinin standartları oluşturmak ve korumak anlamında kaliteye önem vermeleri oldukça önemlidir. Kalite, müşteri spesifikasyonlarını karşılamanın yanı sıra standartları korumak anlamına da gelmektedir. Bu

durum göz önünde bulundurulduğunda, işletmelerin aksiyon almaları ve uygulamada etkili olan yöntemleri kullanmaları oldukça elzemdir. Bu yöntemlerin en yaygın kullanılan ve sonuç alınanı ise istatistiksel kalite kontrolü yöntemidir [1]. İstatistiksel kalite kontrolü (İKK), “bir ürünün önceden belirlenmiş olan kalite standartlarına uygun olarak üretilmesini sağlamak amacıyla, istatistiksel yöntemlerin üretimin tüm aşamalarında uygulanması” olarak değerlendirilebilir [2].

İstatistiksel yöntemler; üretim sürecindeki değişimlerin örneklemeler üzerinden izlenmesinde, bu değişimlerin sebeplerinin araştırılmasında, ürünün spesifikasyon limitlerinin içerisinde üretilmesinde ve ortalama kaymaların önlenmesinde etkili rol oynamaktadırlar. Bu yöntemler sayesinde üretim sürecindeki kaymalar ortaya çıkarılabilmekte ve kaymaların sebepleri araştırılabilmektedir [3].

Bu çalışma kapsamında tekstil ürünleri üreten bir firmanın hammadde kabul aşamasında kalite kontrol yöntemlerinin uygulanması ele alınarak mevcut durumda ayrılan kaynak miktarlarının azaltılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, mevcut durumda uygulanan yöntemler analiz edilerek bu yöntemlerin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Hammaddelerin kalite düzeylerini tespit etmek amacıyla U kontrol grafiği ele alınmıştır. Vaka analizine konu üretici firmanın, tedarikçiden gelen örme kumaş partilerine uygulamış olduğu kabul örnekleme yönteminin standartlaştırılması amacıyla tek katlı kabul planı oluşturulmuştur. Tek katlı kabul planı oluşturulurken MIL-STD 105 D örnekleme tablosu'ndan yararlanılmıştır. Örnekleme planı için işletim karakteristiği (İK Eğrisi) oluşturularak değişik kusurlu oranlarındaki partilerin kabul ihtimalleri incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında tekstil sektörüyle ilgili literatürde yer alan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında ele alınan tekstil firmasının örme kumaşlara uygulamakta olduğu kalite kontrol sistemi ve sistemde belirlenen probleme yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü kısmında kullanılacak kalite kontrol metotları açıklanmıştır. Çalışmanın beşinci kısmında önerilen kalite kontrol yöntemleri uygulanmıştır ve bulgular incelenmiştir. Çalışmanın son ve altıncı kısmında elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde tekstil firmalarında kullanılan istatistiksel kalite yöntemleriyle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde örnekleme planlarının ve işletim karakteristiği eğrilerinin Şahan[4], Gergin ve ark. [5] ve Özdamar [6] tarafından dikkate alındığı görülmektedir. Şahan[4] çalışmasında, tek katlı nitel örnekleme planı kullanan bir üretici seçmiştir. Elde edilen veriler ile, işletme için tek katlı, çok katlı ve ardışık olmak üzere üç ayrı örnekleme

planı hazırlanmıştır. Bu planlar değişik açılardan birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda, tasarlanan üç plan arasından, ardışık örnekleme planının bu işletme için en uygun plan olabileceğine karar verilmiştir. Gergin ve ark. [5] çalışmasında, kabul örnekleme için geliştirilen yöntemlerin uygunluğunu analiz etmek için, kontrol kayıtlarındaki örneklem büyüklükleri ve yorumları çıkarmıştır. Takiben, ANSI/ASQ Z-1.4 (TSE/TS 2756) standardı kullanılarak kabul/ret sonuçları karşılaştırılmıştır. Kabul/ret oranlarının değişimi, hata türlerinin dağılımı ve sebepleri uygulama yapılan işletmeye sunulmuş ve standart örnekleme planlarının yaygınlaştırılması önerilmiştir. Özdamar [6] çalışmasında, değişkenliğin kontrol grafiği üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla işletim karakteristiği (İK) eğrisi kullanılmıştır. Çalışmalarında vaka analizi amacıyla orman endüstri sektöründen bir firmayı baz almışlardır.

Tedarikçi ve/veya üretici kaynaklı hataların tespiti, puanlandırılması, sınıflandırılması ve kontrol grafikleriyle takibi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların özellikle hata türleri belirlenmesi ve sınıflandırılması üzerine yoğunlaştıkları görülmektedir. Bu konularda son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda ise görüntü işleme ve makine öğrenmesi algoritmalarının sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir. Kayaalp ve Erdoğan [7] çalışmasında, tekstil sektöründeki işletmelerde üretim sürecinde üründe oluşan hataların, ürün kalitesini bozduğunu, üretim verimliliğini olumsuz yönde etkilediğini ve üretim maliyetlerini arttırdığını tespit ederek dikiş hatalarının İstatistiksel Proses Kontrol (İPK) yöntemleri üzerinden azaltılması gerekliliğini vurgulamıştır. Kısaoğlu[8] çalışmasında, orta ölçekli bir dokuma işletmesinde İPK teknikleri üzerinden kontrol sistemi kurma çalışmasını ele alarak ve bu kontrol yaklaşımının diğer işletmeler için de örnek oluşturabileceğini göstermiştir. Üretim parametrelerinin belirlenmesinde bir örnekleme planı kullanılması ve duruşlar nedenleriyle birlikte analiz edilmiş ve üretimdeki kumaşlar üzerindeki hatalar ortaya koyulmuştur. Yapılan değerlendirmeler neticesinde incelenen kumaş tiplerinde iplikten gelen hata oranının, dokuma hazırlık/dokuma prosesinden kaynaklanan hata oranından nispeten daha yüksek olduğu görülmüştür. Ala ve İkiz [9] çalışmasında, kumaş topları için gerçekleştirilen kalite kontrol işlemlerini incelemiştir. Kontrol sırasında, hata sayıları ve boyutları kalite kontrol kartlarına kaydedilmiştir.

Hataların tanımlarının yapılmasını takiben kumaş hataları belirlenen puan sistemlerine dayalı puanlandırılmıştır. Hem üreticinin hem de müşterinin üzerinde mutabık olduğu bir hata puan sistemi vasıtasıyla çalışılması gerektiği vurgulanmıştır. Ala ve İkiz [10] çalışmasında, bir tekstil işletmesinde, ışıklı panoda gerçekleştirilen kumaş kontrolü sonucu ortaya koyulan hataları istatistiksel yöntemler üzerinden analiz etmiştir. Kontrol sonucunda ortaya çıkan hata sayılarının değerlendirilmesi amacıyla pareto analizi ve p kontrol grafikleri üzerinde durulmuştur. Yıldız ve Buldu [11] çalışmasında, tekstil endüstrisi için önem arz eden kaşe ve kot kumaş çeşitleri için hataların tespit edilmesi ve sınıflandırılması amacıyla hareket etmiştir. Hataların tespiti amacıyla termal görüntüleme kullanılmış olup bu sayede kumaş hataları tespit edilebilmiş ve sınıflandırılabilmiştir. Ünal ve Ağırgan[12] çalışmasında, hata tiplerinin makineler üzerinden sınıflandırılması ile ilgilenmiş ve yuvarlak örme kumaş üretilen bir işletmede vaka analizi gerçekleştirmiştir. Kontrol limitlerinin belirlenmesiyle birlikte üretim sürecinin analizi gerçekleştirilmiştir. Pınar [13] çalışmasında, denim kumaşlar için hata tespiti ve sınıflandırılması amacıyla görüntü işleme metodunu uygulamıştır. Ayrıca, sınıflandırma için karar ağacı kullanarak farklı yöntemlerle karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Çelik [14] çalışmasında, tekstil ürünlerinin baskı kalite kontrolü için görüntü işleme yöntemini kullanarak insan kaynaklı kusur belirleme hatalarının önüne geçilmesini amaçlamıştır. Arıkan [15] çalışmasında, hata tespiti gerçekleştiren kontrol makinesi çıktılarının daha anlaşılır ve görsel olması için bir altyapı iyileştirme sistemi geliştirmiştir. Çam ve ark. [16] çalışmasında, hataların tespiti için derin öğrenme algoritması geliştirerek tekstil sektöründeki bir firmada uygulanmasını gerçekleştirmiştir. Uygulama sonuçları insanların kontrolünden daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

İşletmelerin sürdürülebilir büyüme modelleri için istatistiksel kalite yöntemlerinin uygulandığı ve etkilerinin analiz edildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Baykal ve Göçer [17] çalışmasında, bir konfeksiyon işletmesinde her kumaş türü ve model kombinasyonu için verimlilik ve kalite metriklerini analiz etmiştir. Rahman [18] çalışmasında, hazır giyim üreticilerinin kaliteli üretim sağlayarak sürdürülebilir iş büyümesi üzerine odaklanmıştır. Üretim operasyonları sırasında kalite

sürecinin uygulanmasının yanı sıra, gelecekte üretimdeki kusurların sayısını azaltarak bitmiş ürünler için nihai kalite kontrol prosedürlerinin uygulanmasının önemi vurgulanmıştır. Özdemir [19] çalışmasında, deri tekstil sektöründe 6 sigma uygulaması gerçekleştirerek beş aşamalı bir uygulama metodoloji önermiştir. Uygulama öncesi ve sonrası karşılaştırmalar ile uygulanan 6 sigma yönteminin firmanın kalite seviyesi üzerine olan etkileri gösterilmiştir.

Literatürde tekstil firmalarında yapılan istatistiksel kalite kontrol için kullanılan yöntemler incelendiğinde çalışmaların üç başlık altında toplandığı görülmektedir. Bunlar, örnekleme planları ve işletim karakteristiği eğrilerini ele alan çalışmalar, hata tespiti ve kontrol grafiklerini ele alan çalışmalar ve sürdürülebilir büyüme ve kalite ilişkisini ele alan çalışmalardır. Bütünsel olarak bakıldığında örnekleme planları, kontrol grafikleri ve işletim karakteristiği eğrisini aynı anda inceleyen çalışmaların yok denecek kadar az olduğu gözlemlenmiştir. İKK alanında gerçekleştirilen uygulamalarda ele alınan yöntemlerin bütünsel olarak değerlendirilmelerinin başarılı sonuçlar elde edilmesinde oldukça önemli olduğu akademik literatürde vurgulanmaktadır. Bu anlamda, bu çalışma literatürdeki bu boşluğu bütünsel olarak sunduğu yöntemlerle dolduracaktır.

3. PROBLEMİN TANIMLANMASI (PROBLEM DESCRIPTION)

Çalışmanın yapıldığı tekstil firması, tedarikçiden satın aldığı örme kumaşlarındaki hataları incelerken, Uluslararası bir kumaş kontrol sistemi olan “4 Puan Kalite Kontrol Sistemi” ni kullanmaktadır.

4 Puan Kalite Kontrol Sistemi: Bu sistem, Amerikan giyim imalatçıları ortaklığı puan derecelendirme sistemi olarak da bilinmekle birlikte, basit olması nedeniyle kumaş kalitesini değerlendirmek amacıyla sıklıkla başvurulmaktadır. Önceden belirlenen standartlar baz alınarak kumaş hatalarına puan değerleri atanır. Toplam hata puanları değerlendirme amacıyla belirlenmektedir. 40 puandan yüksek bir puana sahip kumaş ruloları ikinci kalite olarak değerlendirilir [9].

Örme kumaş kalite kontrol aşamaları şu şekilde ilerlemektedir:

a)Miktar Kontrolü: Örne kumaşlarda partinin tamamı tartılır ve darası düşürülerek (tedarikçiye ait dara verileri dikkate alınarak) net miktar belirlenir.

b)Giriş Kalite Kontrol: Kumaş kalite kontrol elemanı, parti içinden örneklem sayısı kadar topu rastgele seçer ve 4 puan kontrol sistemine göre kalite kontrolünü gerçekleştirir. Parti miktarının %10'u örneklem olarak alınmaktadır.

c) Parti Kullanım Kararının Verilmesi: Giriş kalite kontrol sonucunda onay kararı verilen parti Tedarik Müdürü/Tedarik Sorumlusu/Kumaş Tedarik Sorumlusu değerlendirmesine düşmektedir. Tedarik Müdürü/Tedarik Sorumlusu/Kumaş Tedarik Sorumlusunun bir iş günü içinde nedeniyle birlikte onayı gerekçelendirmesi gerekmektedir.

Tekstil firması, örme kumaşlarda yaptığı kalite kontrol çalışmalarını daha etkin ve dinamik hale getirerek tedarikçileriyle olan ilişkilerini yeniden gözden geçirmeyi ve gerekli önlemleri almayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda; kısıtlı olan iş gücüyle daha fazla hatayı tespit etmek; sorun yaşanmayan tedarikçilerden odağı çekip sorun yaşananlara daha çok odaklanmak istemektedir.

Uygulanacak yöntemler doğrultusunda, hataları doğru tespit ederek ve var olan sistemin analizini yaparak kalite kontrol sistemini standart hale getirilebilecek öneriler sunmayı amaçlamaktadır.

3.1. Kullanılan Araçlar (Applied Methods)

Kontrol grafikleri, küçük büyüklükte ve sık şekilde üretimden alınan örneklemelerin belirlenen metriklerinin (ortalama gibi) zaman içerisindeki seyrinin gösterildiği araçlardır. Bu araçlar sayesinde, ortalamadan kaymalar yakalanabildiği gibi değişimlerin ana nedenleri belirlenebilmektedir [20]. Tedarikçilerin ürettiği örme kumaşların kalite sınırları içerisinde olup olmadığı süreç kontrol diyagramlarından olan ve ölçülemeyen özellikler için tercih edilen U kontrol grafiği kullanılarak incelenecektir.

Tedarikçilerden alınan partiler firma tarafından kalite kontrol işlemlerine tabi tutulmaktadır. Partilerin %10'u kontrol edilmektedir. Kullanılan %10 örnek alma yöntemi geçmiş deneyimlere ve risk analizine dayanmaktadır ve bilimsel alt yapısı bulunmamaktadır. Oysaki örneklem alma işlemi bir standarda bağlı olarak yapılmalı ve parti büyüklüğüne göre kontrol edilecek örneklem miktarı alınmalıdır. Bu aşamada birçok

bilimselyöntem kullanılacağı gibi standart örnekleme tablolarından da faydalanılabilir.

Partilere uygulanan kalite kontrol işlemi tek katlı örnekleme planına uymaktadır. Tek katlı örnekleme planını oluşturmak amacıyla Askeri Standart (MIL-STD) Örnekleme Tablosu'ndan yararlanılmıştır.

İşletim karakteristiği eğrisi oluşturularak değişik kusurlu oranlarındaki partilerin kabul ihtimalleri gösterilecektir. Bu eğriye bakarak iyi partinin reddedilme ve kötü partinin kabul edilme riskleri incelenecektir.

4. VAKA ANALİZİ (CASE STUDY)

4.1. U Kontrol Grafikleri (U Control Charts)

Tekstil firmasının örme kumaş tedarikçilerinin, kalite sınırları içerisinde kumaş üretilip üretilmediğini tespit etmek amacıyla ilk aşamada tüm tedarikçilerin U kontrol grafikleri oluşturulmuştur. Geçmiş yılın kontrol edilen kumaş verileri kullanılarak, alt sınır, üst sınır ve orta değerleri hesaplanarak grafik oluşturulmuştur. U kontrol grafiğini oluştururken; partilerdeki kontrol edilen kumaş toplarının toplam uzunluğu, toplam hata puanı verileri kullanılarak birim alan başına düşen hata kusur sayısı bulunmuştur. Birim başına düşen ortalama kusur sayısı bulunduğundan sonra alt sınır, üst sınır ve orta değerler bulunmuştur. Tüm bu işlemler aşağıda verilen U kontrol grafiği denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Bulgular Tablo 1'de verilmiştir.

Hata puanı denklem 1 ile hesaplanır;

$$\text{Hata Puanı} = \frac{\text{Kontrol Edilen Kumaşın Metresi}}{\text{Toplam Hata Puanı}} \quad (1)$$

Üst kontrol limiti denklem 2 ile hesaplanır [15];

$$\text{ÜKL} = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \quad (2)$$

Orta çizgi değeri denklem 3 ile hesaplanır;

$$OÇ = \bar{u} \quad (3)$$

Denklem 3 içerisindeki \bar{u} ifadesi birim başına düşen kusur sayılarının ortalamasına karşılık gelmektedir.

Alt kontrol limiti denklem 4 ile hesaplanır [20];

$$\text{AKL} = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \quad (4)$$

Birim Başına Düşen Kusur Sayısı denklem 5 ile hesaplanır;

$$\text{Birim Başına Düşen Kusur Sayısı} = \frac{\text{Hata Puanı}}{\text{Kontrol Edilen Kumaş Alanı}} \quad (5)$$

Birim Başına Düşen Ortalama Kusur Sayısı denklem 6 ile hesaplanır;

$$\text{Birim Başına Düşen Ortalama Kusur Sayısı} = \frac{\text{Birim Başına Düşen Kusur Sayısı}}{\text{Kumaş Topu Sayısı}} \quad (6)$$

Tablo 1.T1 Tedarikçisi U Kontrol Grafiği Hesaplamaları (T1 Supplier U Control Chart Calculations)

Tedarikçi Kodu	Kontrol edilen metre uzunluğu	Hata puanı	Birim başına düşen kusur sayısı (u)	Birim başına düşen ortalama kusur sayısı	Üst kontrol limiti	Orta çizgi	Alt kontrol limiti
T1	1475	94	0.06	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	1155	280	0.24	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	1255	210	0.17	0.13	0.16	0.13	0.10
T1	501	269	0.54	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	1265	46	0.04	0.13	0.16	0.13	0.10
T1	761	13	0.02	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	251	20	0.08	0.13	0.19	0.13	0.06
T1	866	13	0.02	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	1165	17	0.01	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	612	1	0.00	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	1242	784	0.63	0.13	0.16	0.13	0.10
T1	1255	5	0.00	0.13	0.16	0.13	0.10
T1	111	1	0.01	0.13	0.23	0.13	0.02
T1	620	10	0.02	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	1431	16	0.01	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	932	72	0.08	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	105	64	0.61	0.13	0.23	0.13	0.02
T1	1034	158	0.15	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	679	50	0.07	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	902	29	0.03	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	902	40	0.04	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	1083	209	0.19	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	1392	385	0.28	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	1401	114	0.08	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	187	59	0.32	0.13	0.20	0.13	0.05
T1	778	49	0.06	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	309	4	0.01	0.13	0.19	0.13	0.07
T1	1425	6	0.00	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	530	12	0.02	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	682	13	0.02	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	1428	341	0.24	0.13	0.15	0.13	0.10
T1	917	49	0.05	0.13	0.16	0.13	0.09
T1	555	66	0.12	0.13	0.17	0.13	0.08
T1	721	28	0.04	0.13	0.17	0.13	0.09
T1	470	57	0.12	0.13	0.17	0.13	0.08

Tablo 1’de yer alan bilgiler şunları ifade etmektedir:

Tedarikçi Kodu: Tedarikçilerin isimlerine karşılık gelen kodlamalar.

Parti: Tedarikçilerden temin edilen kumaş topu partileri.

Kontrol Edilen Metre Uzunluğu: Partilerde bulunan kumaş toplarının kontrol edilen metre uzunluk değerleridir.

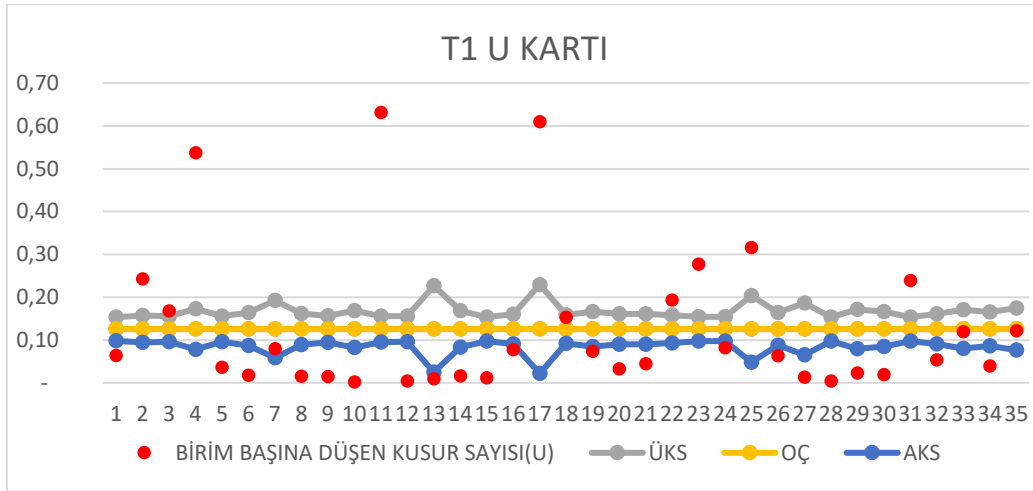
Hata puanları 4 Puan Kalite Kontrol Sistemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

Elde edilen değerler ile T1 tedarikçisi için U kontrol grafiği Şekil 1'deki gibi oluşturulmuştur. Bu grafiğe bakarak kontrol edilen kumaşların kalite sınırları içerisinde bulunup bulunmadığı hakkında bilgi edinilmektedir.

Tedarikçinin üretmiş olduğu örme kumaşların, kalite sınırları içerisinde olmadığı Şekil 1'de çizilen U kontrol grafiğinde görülmektedir. Kumaşlarda oluşan hatalar, hatalı ürün üretimine sebebiyet vermektedir. Üretilen hatalı ürünler, müşteri memnuniyetini düşürmekte ve tekstil firmasının

marka prestijini etkilemektedir. Bu durumda tedarikçilerin, kumaş üretim süreçlerini analiz etmesi, hatalı kumaş oluşumuna sebep olan durumların saptanması ve bu durumların yok edilmesi için özel ve ciddi bir çalışma yürütmesi önerilmektedir.

Süreç kontrol diyagramlarının kullanılmasının nedeni sürecin sürekli olarak izlenmesi ve ortalamada kayma yaşanıp yaşanmadığının tespitidir. Eğer süreç ortalamasında kayma yaşanırsa ve bu durum tespit edilemezse ikinci tip ve tehlikeli olan hata türüyle karşılaşılması kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum, sadece ölçülemeyen özellikler için değil ölçülebilen özellikler için de geçerlidir. Bu nedenle, süreç kontrol diyagramları toplam kalite yönetimi felsefesini benimsemiş ve yalınlaşma çalışmalarında mesafe kateden tüm işletmeler için tavsiye edilmektedir. Bu konuda, uygulama yapılan firmada puanlama göstergesinden ziyade bir süreç kontrol diyagramının kullanılması bir gerekliliktir.



Şekil 1.T1 U Kontrol Grafiği (T1 U Control Chart)

4.2. Tek Katlı Örnekleme Planı (Single Sampling Plan)

Tedarikçilerden alınan partiler tekstil firması tarafından kalite kontrol işlemlerine tabi tutulmaktadır. Partilerin %10'u kontrol edilmektedir. Örneğin 55 kumaş topu içeren bir partiden 6 kumaş alınarak kalite kontrol işlemine tabi tutulmaktadır. Yapılan bu tek katlı örnekleme planı ile partilerin büyüklüklerine göre kontrol edilecek örneklem büyüklüğü belirlenmiştir. Bu örnekleme planında, örneklem büyüklüğü n olarak kabul edilirse partiden rastgele alınan n adet örnekten c tanesi veya daha azı kusurlu ise parti

kabul edilmektedir. Aksi durumda, parti reddedilmektedir. Tek katlı örnekleme planını oluşturmak amacıyla Askeri Standart (MIL-STD) Örnekleme Tablosu'ndan yararlanılmıştır.

Tedarikçilerden temin edilen parti büyüklükleri farklılık göstermektedir. Bu doğrultuda her bir parti büyüklüğü dikkate alınarak örnekleme planı oluşturulmuştur. T1 tedarikçisi için oluşturulan tek katlı örnekleme planı Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2'de yer alan N parti büyüklükleri tedarikçilerden temin edilen kumaş top sayılarıdır. Kabul edilebilir kalite seviyesi 0.2 olarak alınmıştır

(Uygulamanın gerçekleştirildiği firmada 100 puanda 20hata puanı olan kumaşlar kabul edildiği için kalite seviyesi 0.2 olarak belirlenmiştir. Başka uygulamalarda bu seviye değişebilecektir).

N ve kabul edilebilir kalite düzeyini (KKD) dikkate alarak, tablo değerleri okunmuştur. Tablodan, örneklem büyüklüğü ve kabul sayısı değeri

bulunmuştur. Örneğin; 16 ile 25 arasında büyüklüğe sahip partilerden kontrol edilmek amacıyla 5 kumaş topu alınmalıdır ve bu 5 kumaş topunun kabul edilmesi için 0 hata puanına sahip olması gerekmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere numune sayısı arttıkça risk değerlerinin de arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 2. T1 Tedarikçisi Tek KatlıÖrneklemePlanı (SingleSampling Plan for Supplier T1)

TEDARİKÇİ	N=16-25	N=51-90	N=151-280	N=501-1200
	n=5 c=0	n=13 c=0	n=32 c=0	n=80 c=0
T1	1.00	1.00	1.00	1.00
T1	0.95	0.87	0.72	0.44
T1	0.90	0.76	0.52	0.19
T1	0.85	0.67	0.37	0.08
T1	0.81	0.58	0.27	0.03
T1	0.77	0.51	0.19	0.01
T1	0.73	0.44	0.13	0.00
T1	0.69	0.38	0.09	0.00
T1	0.65	0.33	0.06	0.00
T1	0.62	0.29	0.04	0.00
T1	0.59	0.25	0.03	0.00
T1	0.55	0.21	0.02	0.00
T1	0.52	0.18	0.01	0.00
T1	0.49	0.16	0.01	0.00
T1	0.47	0.14	0.00	0.00
T1	0.44	0.12	0.00	0.00
T1	0.41	0.10	0.00	0.00
T1	0.39	0.08	0.00	0.00
T1	0.37	0.07	0.00	0.00
T1	0.34	0.06	0.00	0.00
T1	0.32	0.05	0.00	0.00
T1	0.30	0.04	0.00	0.00
T1	0.28	0.03	0.00	0.00
T1	0.27	0.03	0.00	0.00
T1	0.25	0.02	0.00	0.00
T1	0.23	0.02	0.00	0.00
T1	0.22	0.01	0.00	0.00
T1	0.20	0.01	0.00	0.00
T1	0.19	0.01	0.00	0.00
T1	0.18	0.01	0.00	0.00
T1	0.16	0.00	0.00	0.00
T1	0.15	0.00	0.00	0.00
T1	0.14	0.00	0.00	0.00
T1	0.13	0.00	0.00	0.00
T1	0.1	0.00	0.00	0.00

n: kontrol edilecek kumaş topu; c: kusurlu oranı

4.3. İşletim Karakteristiği Eğrisi (Operating Characteristic Curve)

İşletim karakteristiği eğrisi yardımıyla iyi, ara ve kötü partiler belirlenebilmektedir. Eğride x eksenini (p) partideki kalite seviyesini veya kusurlu oranlarını gösterirken; y eksenini (Pa) bu kusurlu

oranlarına karşılık gelen kabul ihtimallerini göstermektedir. Dolayısıyla P(a) (kabul olasılığı) değerleri kusurlu oranlarına bağlı olarak değişmektedir.

Örnek büyüklüğü n in parti büyüklüğü N e oranı küçük ise; örneğin sonsuz bir kütleden alındığını varsayarak hatalı oranının sabit kalacağı kabul edilebilmektedir. Bu durumda kabul ihtimallerini hesaplamak için binom dağılımı kullanılması söz konusu olabilmektedir [19].

Değişik kusurlu oranına karşılık gelen kabul olasılıkları binom dağılımı kullanılarak bulunmuştur.

Binom dağılımı denklem 7 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P(x) = \binom{n}{c} p^c q^{n-c} \quad (7)$$

Denklemden;

n: örnek hacmi; p: kusurlu oranı; q= 1-p; c: örnekteki oluşan kusurlu sayısını ifade eder.

Partideki kusurlu oran değerleri ve denklem 7 kullanılarak bulunan kabul olasılık değerleri Tablo 3’ de verilmiştir. Örnek hacmi ve kabul sayısı değerleri Askeri Standart (MIL-STD) Örnekleme Tablosu kullanılarak bulunmuştur.

Tablo 3’te N=16- 25, n=5, c=0 için $P(a)=\binom{5}{0} (0)^0 x(1 - 0)^{5-0}=1$ olarak hesaplanmıştır. Her p değeri için aynı hesaplamalar yapılmıştır ve N=16-25 aralığında olan tüm partiler için kabul olasılıkları bulunmuştur.

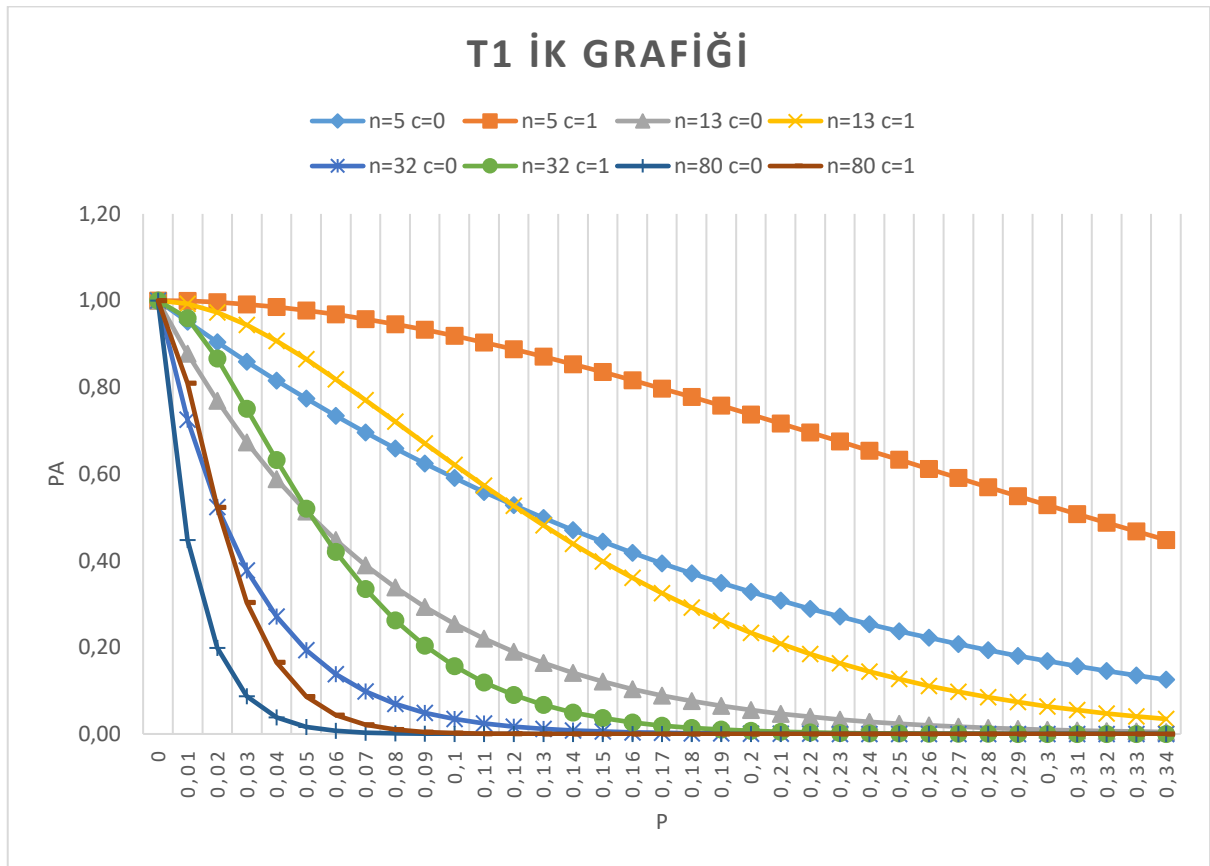
İşletim karakteristiği eğrisinin etkileyen durumların incelenmesi amacıyla N=16-25, n=5, c=1 için de kabul olasılık değerleri hesaplanmıştır. T1 tedarikçisinin değişen parti büyüklükleri (kumaş top sayıları) için İK eğrisi Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 3. T1 Tedarikçisi İK Grafiği Hesaplamaları (Computing of OC Curve for Supplier T1)

Tedarikçi	p	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
		N= 16-25 n=5 c=0	N= 16-25 n=5 c=1	N=51-90 n=13 c=0	N=51-90 n=13 c=1	N=151-280 n=32 c=0	N=151-280 n=32 c=1	N=501-1200 n=80 c=0	N=501-1200 n=80 c=1
T1	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T1	0.00	0.95	1.00	0.88	0.99	0.72	0.96	0.45	0.81
T1	0.00	0.90	1.00	0.77	0.97	0.52	0.87	0.20	0.52
T1	0.00	0.86	0.99	0.67	0.94	0.38	0.75	0.09	0.30
T1	0.00	0.82	0.99	0.59	0.91	0.27	0.63	0.04	0.17
T1	0.10	0.77	0.98	0.51	0.86	0.19	0.52	0.02	0.09
T1	0.10	0.73	0.97	0.45	0.82	0.14	0.42	0.01	0.04
T1	0.10	0.70	0.96	0.39	0.77	0.10	0.33	0.00	0.02
T1	0.10	0.66	0.95	0.34	0.72	0.07	0.26	0.00	0.01
T1	0.10	0.62	0.93	0.29	0.67	0.05	0.20	0.00	0.00
T1	0.10	0.59	0.92	0.25	0.62	0.03	0.16	0.00	0.00
T1	0.10	0.56	0.90	0.22	0.57	0.02	0.12	0.00	0.00
T1	0.10	0.53	0.89	0.19	0.53	0.02	0.09	0.00	0.00
T1	0.10	0.50	0.87	0.16	0.48	0.01	0.07	0.00	0.00
T1	0.10	0.47	0.85	0.14	0.44	0.01	0.05	0.00	0.00
T1	0.20	0.44	0.84	0.12	0.40	0.01	0.04	0.00	0.00
T1	0.20	0.42	0.82	0.10	0.36	0.00	0.03	0.00	0.00
T1	0.20	0.39	0.80	0.09	0.32	0.00	0.02	0.00	0.00
T1	0.20	0.37	0.78	0.08	0.29	0.00	0.01	0.00	0.00
T1	0.20	0.35	0.76	0.06	0.26	0.00	0.01	0.00	0.00
T1	0.20	0.33	0.74	0.05	0.23	0.00	0.01	0.00	0.00

Tablo 3.'ün devamı

T1	0.20	0.31	0.72	0.05	0.21	0.00	0.01	0.00	0.00
T1	0.20	0.29	0.70	0.04	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.20	0.27	0.67	0.03	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.20	0.25	0.65	0.03	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.24	0.63	0.02	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.22	0.61	0.02	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.21	0.59	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.19	0.57	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.18	0.55	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.17	0.53	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.16	0.51	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	0.30	0.15	0.49	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00



Şeki 2. T1 İK Eğrisi (OC Curve for T1)

Örnek büyüklüğü arttıkça İK eğrisinin dik bir yapıya kavuşması beklenmektedir. Böylece, örnek büyüklüğü yüksek olduğu durumda örneklem planlarının daha etkili kullanılabileceği düşünülebilir [20].

Küçük kabul sayıları İK eğrisinin daha dik oluşmasına yol açmaktadır. Diğer bir ifadeyle, tüketici açısından daha küçük kabul sayıları daha iyi kalite korumasının önünü açmaktadır. Dik bir İK eğrisi ile ikinci tip hatanın (tüketici riskleri) olasılıkları da azaltılabilmektedir.

Şekil 2 incelendiğinde, örnek büyüklüğü ne kadar fazla ise örneklem planlarının o kadar iyi sonuçlara yol açacağı görülebilmektedir. T1 tedarikçisinin İK eğrisi incelendiğinde, $p=0.2$ için; $n=5$ değerinin üretici riski 0.67 ve tüketici riski 0.07, $n=80$ değerinin üretici riski 0.99 ve tüketici riski 0.00009 olarak bulunur. Örnek büyüklüğü arttıkça üretici riski (α) artarken, tüketici riski (β) düşmektedir.

Üretici riski (α) p_1 oranında kusurlu bulunduran iyi kalitedeki bir üretimden şansa bağlı olarak seçilen bir partinin reddedilme riskidir. Tüketici

riski ise β ile gösterilir ve istemeyen bir p_2 oranında kusurlu bulunduran partinin kabul edilme riskini ifade eder [7].

İK eğrileri örnekleme planları için özel oluşturulmaktadır ve hem üretici hem de tüketici risklerinin belirlenmesinde yararlanılmaktadırlar. Bu risklerin hesaplanması için ilk olarak kabul edilebilir kalite düzeyi (KKD) ve parti toleransı (PT)'nin tespit edilmesi gerekmektedir. KKD, maksimum kabul edilebilir standartları sağlamayan ürün yüzdesidir. PT nispeten kabul edilebilir ancak yine de ürünlerin kaliteli olup olmadığının belirlendiği ilk çizgidir. Diğer bir ifadeyle, müşteri tarafından kabul edilebilir en düşük kabul olasılığıdır. Üretici partilerin yüksek bir olasılıkla kabul edilmesini temenni ederken, tüketici kötü partilerin kabul olasılığının düşük tutulmasını bekler [10].

Üretici ve tüketici riski İK eğrisine bakılarak bulunduğu gibi binom dağılımı denklemleri kullanılarak da bulunmaktadır.

Bu çalışmada;

Kabul Edilebilir Kalite Seviyesi: 0.2

Parti Toleransı: 0.4 alınarak üretici ve tüketici riskleri hesaplanır.

Tek katlı örnekleme planı p_1 kusurlu oranlı partiler için $(1 - \alpha)$ kabul olasılığına ve p_2 kusurlu oranlı partiler için (β) kabul olasılığına sahip olmalıdır. Binom dağılımı durumunda;

Denklem 8 kullanılarak üretici riski hesaplanır.

$$1 - \alpha = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_1^i (1 - p_1)^{n-i} \quad (8)$$

Denklem 9 kullanılarak tüketici riski hesaplanır

$$\beta = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_2^i (1 - p_2)^{n-i} \quad (9)$$

T1 tedarikçisi için denklem 8 ve denklem 9 kullanılarak üretici ve tüketici riski hesaplanmış ve Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. T1 Tedarikçisi Üretici ve Tüketici Riskler(Producer and Consumer Risks for Supplier T1)

	1-alfa	Üretici Riski	Tüketici Riski
n=5 c=0	0.32	0.67	0.07
n=5 c=1	0.73	0.26	0.33
n=13 c=0	0.05	0.94	0.00
n=13 c=1	0.23	0.76	0.01
n=32 c=0	0.00	0.99	0.00
n=32 c=1	0.00	0.99	0.00
n=80 c=0	0.00	0.99	0.00

Aynı örnek hacminde kabul sayısı değiştikçe üretici riski ve tüketici riski değişiklik göstermektedir. $n=5$ durumunda kabul sayısının artması durumunda üretici riski azalmış, tüketici riski artmıştır. $n=13$ durumunda kabul sayısının artması durumunda üretici riski azalmış, tüketici riski artmıştır.

İyi partinin reddedilmesi veya kötü partinin kabul edilmesi riskleri örnek hacmi ve kabul sayısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu sebeple kalite kontrol işlemlerini belirli bir standart çerçevesinde sürdürmek önem arz etmektedir. Tüm tedarikçiler için U kontrol grafikleri oluşturulmuş, tek katlı örnekleme planı oluşturulmuş ve İK grafikleri çizilerek üretici ve tüketici riskleri bulunmuştur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında bir tekstil firmasının örme kumaşlara uyguladığı kalite kontrol süreci ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; tedarikçiden temin edilen partiden kalite kontrol amacıyla örneklem alma yönteminde eksiklik olduğu tespit edilmiştir. Eksikliğin giderilmesi amacıyla kalite kontrol yöntemlerinden U kontrol grafiği, tek katlı örnekleme planı ve işletim karakteristiği yöntemlerine başvurulmuştur ve tedarikçilerin durumlarının izlenmesi kolaylaşmıştır.

Yapılan uygulamalar ile tedarikçilerin ürettiği olduğu örme kumaşların kalite sınırları içerisinde olup olmadığı U kontrol grafikleri yardımıyla incelenmiş olup, örme kumaşların kalite sınırlarını aştığı gözlenmiştir. Kalite sınırlarını aşan örme

kumaşlar hatalı ürünler oluşumuna sebebiyet vermektedir ve bu durum sonucunda müşteri memnuniyeti düşmektedir.

Tedarikçiden temin edilen parti büyüklükleri farklılık göstermektedir. Bu sebeple her partiye %10 örnek alma yöntemi kullanılması doğru bir kalite kontrol çalışması yapılmasını engellemektedir. Bunu önlemek amacıyla tek katlı örnekleme planı tasarlanmıştır. Tek katlı örnekleme planı tasarlanırken Askeri Standart (MIL-STD) Örnekleme Tablosu'ndan yararlanılmıştır. Bu tablo kullanılarak değişen parti büyüklüklerinden alınması gereken örnekleme ve kabul sayısı belirlenmiştir. Daha sonra değişik kusurlu oranlarındaki partilerin kabul olasılıklarını incelemek amacıyla işletim karakteristiği eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğriye bakarak partilerin durumu hakkında bilgi edinilmektedir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sonucunda kalite seviyelerinin izlenmesi için puanlandırma sistemi yerine süreç kontrol diyagramlarının kullanılmasının daha efektif olduğu gösterilmiştir. Kabul örnekleme planları sektöre ve firmaların uyguladıkları politikalara göre değişim göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmayla uygulama yapılan firma için uygun örnekleme planlarının gösterimi yapılmış hem de süreç kontrol diyagramlarının ortalamada yaşanabilecek kaymaları yakalamadaki etkinliği gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, U kontrol grafiğinden ve tek katlı örnekleme planından farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabileceği gibi yapılan çalışma farklı üretim firmalarına da uygulanabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandığı materyal ve yöntemlerin araştırma ve yayın etiğine uyduğunu beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods used in their work comply with research and publication ethics.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS CONTRIBUTIONS)

Ömer Faruk YILMAZ: Araştırmaları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the investigation, 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] Kılıç, M., (2006). İstatistiksel Kalite Kontrolü ve Tekstil İşletmelerinde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- [2] Doğan, Ü., (1991). Kalite Yönetimi ve Kontrolü. İstiklal Matbaası.
- [3] Grant, E. L., Leavenworth, R. S., (1980). Statistical quality control. New York: McGraw-Hill.
- [4] Şahan S., (2003). Acceptance sampling methods used in quality control and an application. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [5] Kayaalp, İ. D., Erdoğan, M. Ç., (2009). Konfeksiyon işletmesinde dikiş hatalarının istatistiksel proses kontrol yöntemlerini kullanarak azaltılması. Tekstil ve Konfeksiyon, 19(2), 169-174.
- [6] Özdamar, İ. H., (2014). İşletim karakteristiği eğrisi ve bir çalışma. Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 5(10), 86-91.
- [7] Gergin, Z., Özkan, C., Ayan B., (2014). Kalite Kontrol Faaliyetlerinde Uygun Kabul Örnekleme Planı Kullanımı: Bir Tekstil İşletmesinde İnceleme. 14. Üretim Araştırmaları Sempozyumu (UAS 2014) 14th Symposium for Production Research.
- [8] Kısaoglu, Ö. D., (2010). Orta Büyüklükte Bir Dokuma İşletmesinde İstatistiksel Proses Kontrol Sistemi: I. Kumaş Hatalarının Kontrolü. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 291-301.
- [9] Ala, D. M., İkiz, Y., (2015a). Defect Detection of Velvet Bathrobe Fabrics and Grading with Demerit Point Systems. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(7), 288-295.
- [10] Ala, D. M., İkiz, Y., (2015b). A Statistical Investigation for Determining Fabric Defects That Occur During Weaving Production. Pamukkale

Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(7), 282-287.

[11] Yıldız, K., Buldu, A., (2017). Kumaş hata tespiti ve sınıflandırmada dalgacık dönüşümü ve temel bileşen analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(5), 622-627.

[12] Ünal, C., Ağırhan, A. Ö., (2018). Yuvarlak Örme Kumaş Hatalarının Kontrol Kartlarıyla İstatistiksel Analizi. Tekstil ve Mühendis, 25(111), 246-253.

[13] Pınar, Z., (2020). Makine öğrenmesi yaklaşımları kullanılarak denim kumaşlarda kusur tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

[14] Çelik, A., Tekin, E., (2020). Tekstil Baskı Kalite Kontrolünün Görüntü İşleme Teknikleri ile Gerçekleştirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 268-276.

[15] Arıkan, C. O., (2021). Akıllı kumaş kontrol makinesi için raporlama ve altyapı iyileştirme sistemi geliştirilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(3), 969-982.

[16] Çam, K., Aydın, C., Tarhan, C., (2022). Classification of Fabric Defects Using Deep Learning Algorithms. Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU).

[17] Baykal, P. D., Göçer, E., (2012). Konfeksiyonda kumaş ve model çeşitliliğinin üretimde kalite ve verimliliğe etkisi. Tekstil ve Mühendis, 19(87), 14-23.

[18] Rahman, A. K. M., S., (2018). Quality Control Management on Apparel Order Process: A Case Study in Bangladesh Garment Industry. International Journal of Science and Research, 7(2), 89-92.

[19] Özdemir, H., (2022). Deri tekstil firmasında altı sigma uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

[20] Montgomery, D. C., (2009). Statistical quality control. New York: Wiley.

Investigation of the Effects of Replacing Mn with Cu on the Structural and Mechanical Properties of Cantor High Entropy Alloy

Kürşat İÇİN^{1*}, Sefa Emre SÜNBLÜ², Ataberk YILDIZ¹

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Trabzon, Turkey

²Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gaziantep, Turkey

Article Info

Research article

Received: 20/01/2023

Revision: 22/05/2023

Accepted: 23/05/2023

Keywords

High Entropy Alloy
Microstructure
Examination
Mechanical Properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 20/01/2023

Düzeltilme: 22/05/2023

Kabul: 23/05/2023

Anahtar Kelimeler

Yüksek Entropili Alaşımlar
Mikroyapı İncelemesi
Mekanik Özellikler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study compared microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiMn and CoCrFeNiCu. The tensile strength of CoCrFeNiMn was 501 MPa with yield strength of 212 MPa. The tensile strength of CoCrFeNiCu was 491 MPa with yield strength of 290 MPa. The latter exhibited copper-rich secondary phase while the former did not. / Bu çalışmada, CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu alaşımlarının mikroyapısını ve mekanik özelliklerini karşılaştırılmıştır. CoCrFeNiMn'nin çekme dayanımı 501 MPa ve akma dayanımı 212 MPa iken. CoCrFeNiCu'nun çekme dayanımı 491 MPa ve akma dayanımı 290 MPa'dır. İkincil bir faz oluşumu görülmeyen CoCrFeNiMn'ye karşılık, CoCrFeNiCu bakır açısından zengin bir ikincil faz oluşmuştur.

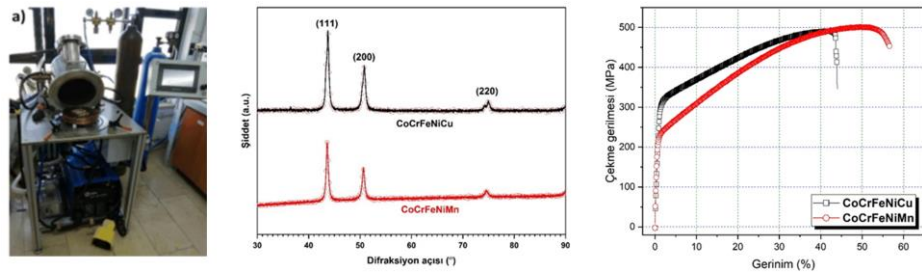


Figure A: The vacuum arc furnace used in the study and the observed results/ **Şekil A:** Çalışmada kullanılan vakum ark fırını ve gözlenen sonuçlar.

Highlights (Önemli noktalar)

- Replacement of Mn with Cu has significant effects on the microstructure of the Cantor. / Mn'nin Cu ile değiştirilmesi, Cantor alaşımının mikroyapısı üzerinde belirgin etkilere sahiptir.
- Addition of Cu in CoCrFeNiCu alloy results in the formation of a copper-rich secondary phase, while no secondary phase is observed in CoCrFeNiMn alloy. / CoCrFeNiCu alaşımında, bakırca zengin ikincil bir faz oluşumunu gösterirken, CoCrFeNiMn alaşımında ikincil faz gözlenmemiştir.
- The addition of Cu improves the mechanical properties of CoCrFeNiCu alloy compared to Mn-containing CoCrFeNiMn alloy. / Cu ilavesi, CoCrFeNiCu alaşımının mekanik özelliklerini Mn içeren CoCrFeNiMn alaşıma göre artırmıştır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the effects of replacing Mn with Cu on the microstructure and mechanical properties of the classical Cantor high entropy alloy. / Bu çalışmanın amacı, Mn'nin Cu ile değiştirilmesinin Cantor yüksek entropi alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): This study is the first to investigate the effects of replacing Mn with Cu on the microstructure and mechanical properties of the Cantor alloy. / Bu çalışma, Mn'nin Cu ile değiştirilmesinin Cantor alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ilk kez inceleyen bir araştırmadır.

Results (Bulgular): This study reveals a significant alteration in the microstructure and mechanical properties of the Cantor alloy upon replacing Mn with Cu. / Bu çalışma, Mn'nin Cu ile değiştirilmesinin Cantor alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinde belirgin bir değişikliğe neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Conclusion (Sonuç): The results of this study demonstrate that the replacement of Mn with Cu significantly influences the microstructure and mechanical properties of the Cantor alloy. / Mn'nin Cu ile değiştirilmesinin Cantor alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.



Cantor Yüksek Entropili Alaşımına Mn Yerine Cu İkamesinin Yapısal ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Kürşat İÇİN^{1*}, Sefa Emre SÜNBLÜ², Ataberk YILDIZ¹

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

²Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/01/2023
Düzeltilme: 22/05/2023
Kabul: 23/05/2023

Anahtar Kelimeler

Yüksek Entropili Alaşımlar
Mikroyapı İncelemesi
Mekanik Özellikler

Öz

Bu çalışmada klasik Cantor yüksek entropili alaşımın bileşiminde yer alan Mn yerine eklenen Cu elementinin mikroyapıda ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu yüksek entropili alaşımları ark ergitme ile üretilmişlerdir. X-ışını difraktometresinden elde edilen veriler her iki alaşımın da yüzey merkezli kübik yapıya sahip olduğunu bulunmuştur. CoCrFeNiMn alaşımının mikroyapısında herhangi bir ikinci faz görülmezken CoCrFeNiCu alaşımının mikroyapısında YMK yapılı matris ve bakırca zengin YMK yapılı ikinci faz oluşumu belirlenmiştir. CoCrFeNiMn alaşımının maksimum çekme gerilmesi 501 MPa iken CoCrFeNiCu alaşımının maksimum çekme gerilmesi 491 MPa olarak bulunmuştur. Her iki alaşımın akma dayanımları karşılaştırıldığında Mn'lı CoCrFeNiMn alaşım için 212 MPa, Cu'lu CoCrFeNiCu alaşım için 290 MPa olarak hesaplanmıştır. CoCrFeNiMn için ölçülen %56,67 gerinimi CoCrFeNiCu alaşımında %43,97'ye azalmıştır.

Investigation of the Effects of Replacing Mn with Cu on the Structural and Mechanical Properties of Cantor High Entropy Alloy

Article Info

Research article
Received: 20/01/2023
Revision: 22/05/2023
Accepted: 23/05/2023

Keywords

High Entropy Alloy
Microstructure
Examination
Mechanical Properties

Abstract

In this study, the effects of replacing Mn in the composition of the classical Cantor high entropy alloy with Cu on microstructure and mechanical properties were investigated. The CoCrFeNiMn and CoCrFeNiCu high entropy alloys were produced by vacuum arc melting. X-ray diffraction showed that both alloys have a face-centered cubic structure. The microstructure of the CoCrFeNiMn alloy shows no secondary phase while the microstructure of the CoCrFeNiCu alloy shows the presence of a matrix in a face-centered cubic structure and second phase rich in copper. The maximum tensile strength of the CoCrFeNiMn alloy was found to be 501 MPa, while that of the CoCrFeNiCu alloy was 491 MPa. When comparing the yield strength of both alloys, the Mn-containing CoCrFeNiMn alloy was found to have a yield strength of 212 MPa, while the Cu-containing CoCrFeNiCu alloy had a yield strength of 290 MPa. The strain of the CoCrFeNiMn alloy was measured to be 56.67% and for CoCrFeNiCu alloy was 43.97%.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek entropi alaşımları (YEA), genellikle benzer atom çaplarına sahip beş veya daha fazla elementten oluşan, tek bir katı çözelti fazı içeren metal malzemelerdir [1,2]. Geleneksel metallere farklı olarak, YEA'lar için termodinamik olarak yüksek entropi etkisi, kristal yapıda latis distorsiyonu etkisi, dinamikte yavaş difüzyon etkisi ve "kokteyl" etkisi gibi dört özellik ortaya çıkmıştır [3]. YEA'lar, son yıllarda yüksek sıcaklık stabilitesi ve mukavemet, çekme özellikleri, kırılma dayanımı gibi mekanik özellikleri nedeniyle gelişmiştir [4,5]. Bu nedenle, YEA'lar,

biyolojik malzemeler, süper iletken malzemeler, hidrojen depolama malzemeleri gibi birçok endüstri alanında geniş uygulama perspektifleri sunmaktadır [6,7]. Yüksek entropili alaşımlarda genellikle yüzey merkezli kübik, hacim merkezli kübik veya sıkı paket hekzagonal gibi basit bir kristal yapıya sahiptirler. YEA'lar yüksek mekanik, yüksek sertlik ve mukavemete, iyi korozyon direnci, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık stabilitesi ve yüksek gerilim oranlı süper plastisite özelliklerine sahiptir [8,9].

Bu amaçla üretilmiş ilk alaşımlardan biri Cantor alaşımı olarak bilinen CoCrFeNiMn yüksek

entropili alaşımıdır. Bu alaşım, yüksek süneklik özelliğine sahip olan yüzey merkezli kübik yapıya (YMK) sahiptir. Bu alaşım genel olarak, sıvı nitrojen sıcaklığında olağanüstü süneklik özelliğine sahiptir [10,11]. Oda sıcaklığında homojenleştirme tavlama uygulanmış uzama oranı %80 ve akma dayanımı 300 MPa'dır [12]. Süneklikten önemli ölçüde ödün vermeden mukavemeti artırmak için ek güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla söz konusu alaşıma farklı koşullarda ısıl işlemler [13], mekanik prosesler [14] ve ikame metal [15] veya metal katkılama (dop) [16,17] şeklinde farklı özelliklere sahip elementler eklenerek kimyasal bileşimin mekanik özellikler üzerindeki etkileri bilim insanları tarafından araştırılmış ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Cantor alaşımında bulunan Mn elementi diğer elementlere kıyasla katılaştırma sırasında daha düşük difüzyon katsayısına sahip olmasında dolayı tek bir katı çözelti fazı oluşumunu desteklemektedir. Ancak, Cantor alaşımının mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla mikroyapıda iki farklı katı çözelti fazının oluşturulmasına yönelik birçok çalışma yapılmaktadır [18,20]. YMK kristal yapıya sahip tüm YEA'lar için nispeten düşük bir akma mukavemeti ortak bir dezavantajdır. Geçiş elementleri ile alaşımlama, bu alaşımları yapısal uygulamalarda kullanılabilecekleri şekilde güçlendirmek için genel bir yoldur [21]. Bunun en önemli sebeplerinden biri birçok alaşımın bileşiminde yer alan Mn elementinin yavaş difüzyon etkisidir.

CoCrFeNiCu YEA en sık incelenen YEA'lardan biridir. Bununla birlikte, Cu ve Co, Cr, Fe arasındaki pozitif karıştırma entalpisi ve Cu ve Ni arasındaki oldukça küçük negatif karıştırma entalpisi, ciddi Cu segregasyonuna ve döküm defektlerine (hatalarına) neden olmaktadır [22,23]. Bu nedenle, birçok araştırmacı Cu oranını azaltarak Cu segregasyonunu azaltma ya da ortadan kaldırma yolunu denedi ve böylece mikro yapı ve mekanik özellikleri iyileştirilmesi amaçlandı. Ancak, eşit atomik CoCrFeNiCu YEA'da solidifikasyon sırasında Cu segregasyonunun kontrolü nadiren rapor edilmiştir [24,25]. Önemlisi, Cu segregasyonunun katılma parametreleri ile ve CoCrFeNiCu YEA'nın mikro yapı evrimi ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki hala net değildir.

Bu çalışmada, mangan elementinin neden olduğu yavaş difüzyon etkisini azaltmak ve mikroyapıda farklı katı çözelti fazlarını oluşturmak amacıyla Cantor alaşımına Cu elementi eklenmiştir. Cantor alaşımı, CoCrFeNiMn alaşımına benzer bir temel kompozisyona sahiptir, ancak Cu elementi ile modifiye edilmiştir. Cu'nun eklenmesi, Mn'nin

yerine geçerek difüzyon sürecini hızlandırmakta ve alaşımın mikroyapısını etkilemektedir. Bu çalışma, CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu alaşımlarının yapısal, mekanik ve elektrokimyasal özelliklerini karşılaştırarak, Cu elementinin Mn yerine geçmesinin alaşımın performansını nasıl etkilediğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu bilgi, alaşım tasarımı ve malzeme mühendisliği açısından önemli olabilir ve ileriye yönelik çalışmalarda alaşım özelliklerinin optimize edilmesine katkı sağlayabilir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu yüksek entropili alaşımların hazırlanmasında her bir metallerin ağırlığı eş atomik olarak hesaplanmıştır. Alaşımların üretilmesinde kullanılan metaller en az %99,9 saflıkta olup Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir. Alaşımların hazırlanmasında vakum ark ergitme yöntemi kullanılmıştır. Alaşımların hazırlanmasında her ergitme öncesinde sistem 10^{-3} mbar vakum atmosferi oluşturulmuştur. Ergitme işlemleri %99,9 saflıkta 400 mbar argon gazı atmosferinde, su soğutmalı bakır pota ve tungsten elektrot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kimyasal homojenliği sağlamak için her bir alaşım beş defa yeniden ergitilmiştir. Bu işleme ek olarak alaşım her bir ergitme sonrasında ters çevrilerek yeni ergitme işlemi uygulanmıştır. Ergitme işlemi sonrası alaşımın bileşimi optik emülsiyon spektrometresiyle (OES) kontrol edilmiştir. OES ile elde edilen analiz sonuçları aşağıda Tablo 1'de sunulmuştur. Alaşımların faz yapıları PANalytical X'pert Powder³ model x-ışını difraktometresi ile $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) radyasyon kaynağı kullanarak $3^\circ/\text{dk}$. $2\theta = 10-90^\circ$ arasında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ark ergitmeyle hazırlanan alaşımların metalografik, mekanik ve elektrokimyasal özelliklerini incelemek için numuneler tel erozyon yöntemiyle kesilmiştir. Metalografik incelemeler için sırasıyla 800, 1200 ve 1200 nolu zımpara kağıdıyla zımparalama ve 1 ve 0,25 μm elmas solüsyonla parlatma işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerden ardından mikroyapısal inceleme için parlatılan yüzey %3 Nital ayracıyla dağlanmıştır. Mikroyapı incelemeleri Zeiss EVO LS10 model taramalı elektron mikroskopuyla, manganlı YEA fazların kimyasal kompozisyonları Oxford marka, bakırlı YEA fazların kimyasal analizinde EDAX marka EDS ile analiz edilmiştir. Üretilen alaşımlara çekme deneyleri uygulamak için numuneler $1,51 \times 2,6 \times 10 \text{ mm}$ (kalınlık;genişlik;uzunluk) boyutlarında tel erozyonla kesilmiştir. Çekme

testleri Instron 3382 model çekme test cihazıyla 5×10^{-4} mm/s deformasyon hızında yapılmıştır.

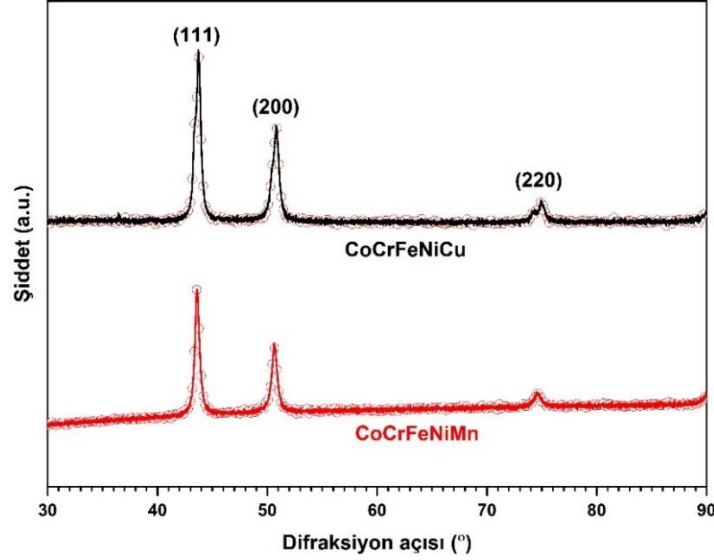
Tablo 1. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşımların kimyasal kompozisyonlarının teorik ve ölçülen değerler ile karşılaştırması (Comparison of chemical compositions of high entropy alloys produced by vacuum arc melting method with theoretical and measured values)

Metal	Ağırlıkça Oranlar			
	CoCrFeNiMn		CoCrFeNiCu	
	Teo.*	Ölç.*	Teo.*	Ölç.*
Co	21.02	21.08	20.39	20.42
Cr	18.54	18.48	17.99	18.05
Fe	19.92	20,59	19.32	19.27
Ni	20.93	20.92	20.31	20.30
Mn	19.59	19.52	-	-
Cu	-	-	21.99	21.96

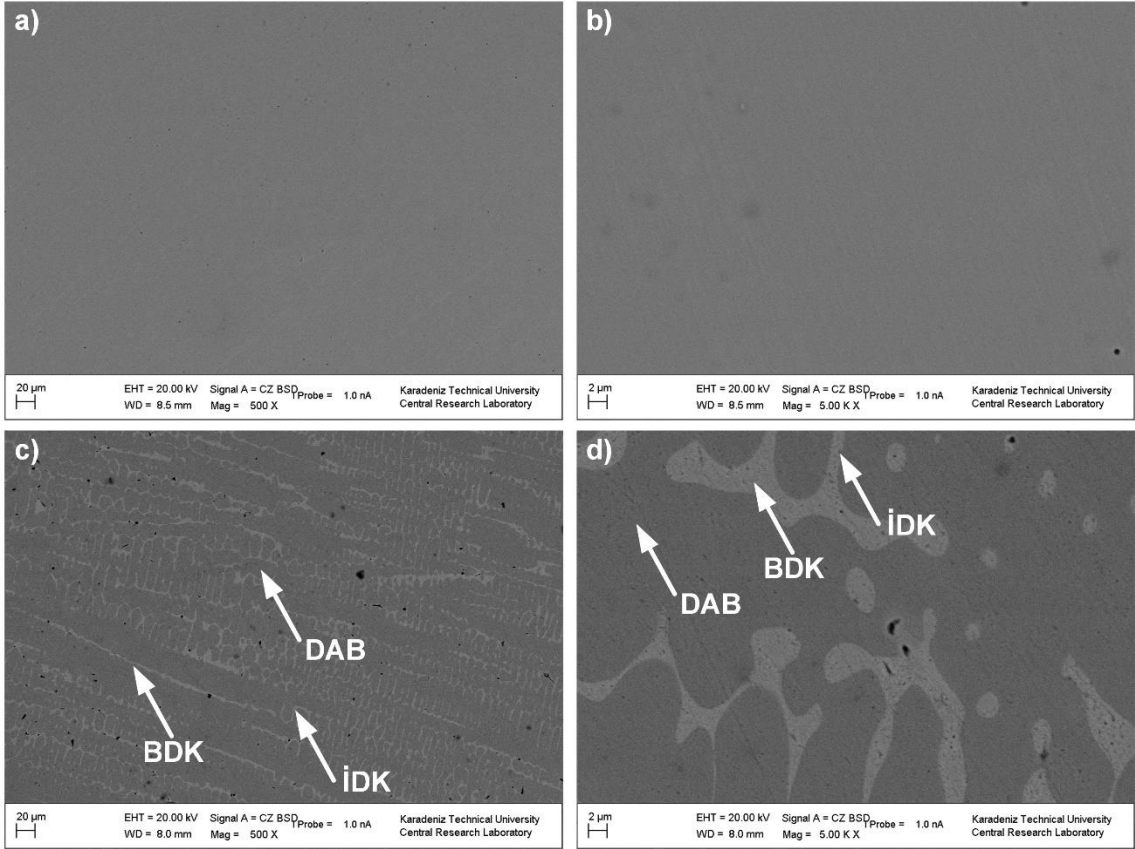
3. RESULTS (BULGULAR)

Şekil 1’de ark ergitme ile üretilmiş CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu yüksek entropili alaşımlarının x-ışını kırınım desenleri gösterilmiştir. Her iki yüksek entropili alaşıma ait kırınım piklerinin benzer olduğu Şekil 1’den görülmektedir. X-ışını difraktometresinden elde edilen bu veriler her iki alaşım yüzey merkezli kübik yapıya (YMK) sahiptir. Kırınım desenlerinde görülen üç pik sırasıyla (110), (200) ve (220) düzlemlerine aittir. Her iki alaşımda keskin piklerin olması yapının kristalli bir yapıda olduğunu gösterse de her iki alaşım için aynı kırınım piklerinin şiddetlerinin farklı olduğu gözlenmiştir. CoCrFeNiMn ait pik şiddetlerinin CoCrFeNiCu ait pik şiddetlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Vakum ark ergitme ile üretilen yüksek entropili alaşımların pik

şiddetlerindeki değişim yüksek entropili alaşımlarda görülen yavaş difüzyon etkisinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Mangan elementinin YEA bileşiminde bulunmasındaki temel amacı katılaşma sırasında difüzyonu yavaşlatarak tek bir katı çözümlü fazının oluşturulmasıdır. Mangan metallinin yerine eklenen bakır metali ise katılaşma sırasında difüzyonu hızlandırmasından dolayı kırınım piklerine ait yükseklikler daha şiddetli ortaya çıkmıştır. CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu alaşımlarının kristal stabilizasyonunu karşılaştırıldığından Cu içeren YEA daha stabil bir yapıya sahip olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Literatürden de bilindiği üzere Cu metalinin diğer elementler içerisindeki difüzyon oranının YEA kompozisyonunda bulunan diğer elementlere göre daha yüksektir. Bu durum, Cu YEA’ın katılaşması sırasında daha stabil yapıya sahip katı çözümlü fazının oluşmasını sağlamıştır [26,27].



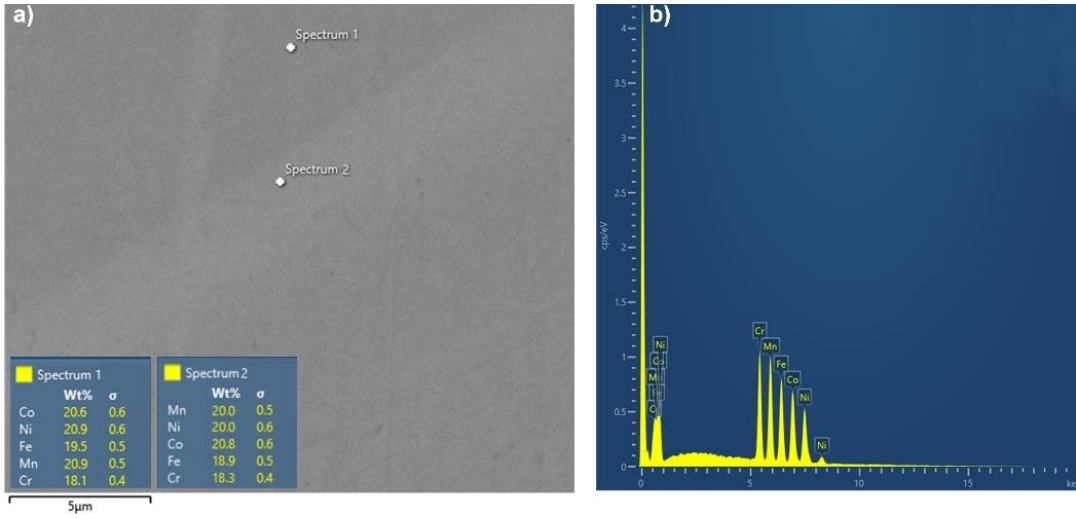
Şekil 1. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşımların x-ışını kırınım desenleri (X-ray diffraction patterns of high entropy alloys produced by vacuum arc melting)



Şekil 2. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Scanning electron microscope (SEM) images of high entropy alloys produced by vacuum arc melting)

Şekil 3'de CoCrFeNiMn YEA'a ait noktasal EDS sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.a'da verilen SEM görüntüsü üzerinden alınan iki farklı noktanın kimyasal bileşimleri Şekil 3.a içinde gösterilirken spektrum 1'e ait olan noktanın enerji dağılım grafiği Şekil 3.b'de verilmiştir. Spektrum 1 ile gösterilen noktanın kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %20,6 Co, %18,1 Cr, %19,5 Fe, %20,9

Ni ve %20,9 Mn'dan oluşurken spektrum iki ile gösterilen noktanın kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %20,8 Co, %18,3 Cr, %18,9 Fe, %20,0 Ni ve 20,0 Mn'dan oluşmaktadır. Her iki noktanın bileşimlerinin birbirine yakın olması mangan içeren alaşımda tek bir katı çözeltili fazının oluştuğunu doğrulamaktadır.

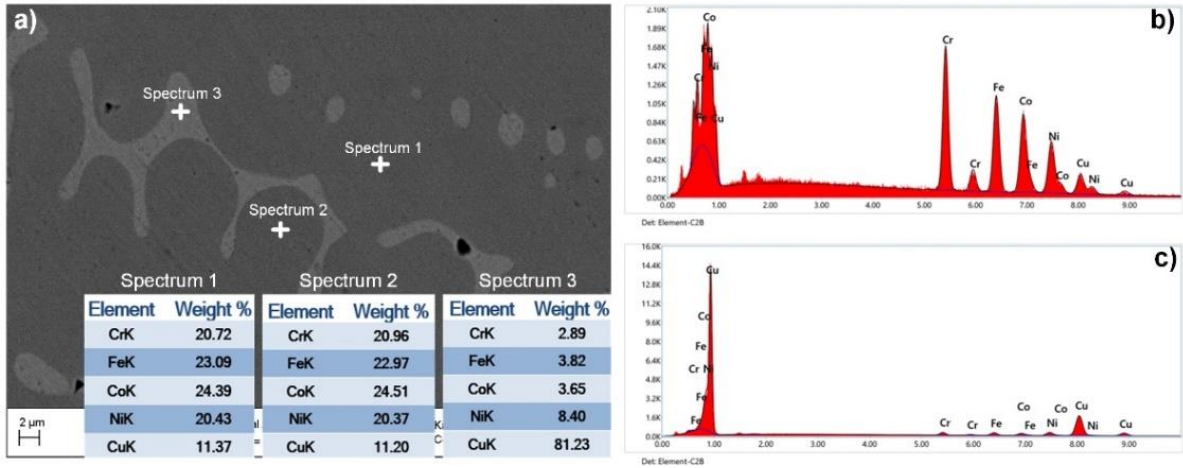


Şekil 3. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen CoCrFeNiMn YEA EDS analizi (YEA EDS analysis of CoCrFeNiMn produced by vacuum arc melting method)

Şekil 4'te mangan yerine bakır içeren CaCrFeNiCu YEA EDS analizi sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.a'da koyu gri (Spektrum 1 ve 2) ve açık gri (Spektrum 3) noktalarından alınan EDS spektrumları Şekil 4.b (Spektrum 1 için) ve Şekil 4.c'de (Spektrum 3 için) gösterilen kantitatif sonuçlar Şekil 4.a'daki SEM fotoğrafının içerisinde verilmiştir. Koyu bölgeden alınan Spektrum 1 noktasının kimyasal bileşimi ağırlıkça %24,39 Co, %20,72 Cr, %23,09 Fe, %20,43 Ni ve %11,37 Cu, Spektrum 2 noktası %24,51 Co, %20,96 Cr, %22,97 Fe, %20,37 Ni ve %11,20 Cu içermektedir. Bu koyu renkte kontrasta sahip bölgenin homojen bir kimyasal bileşimden oluştuğunu göstermektedir. Açık bölgeler üzerinde Spektrum 3 ile gösterilen bölgenin kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %3,65 Co, %2,89 Cr, %3,82 Fe, %5,40 Ni ve %81,23 Cu içermektedir. Koyu ve Açık gri kontrasta sahip bölgeler arasında oluşan bu farklılık temel sebebi Cu'nun sahip olduğu pozitif karışım entalpisidir. Bakır pozitif karışım entalpisine sahip olmasından dolayı yüksek entropili alaşım katılaşması esnasında faz segregasyonuna neden olarak birincil ve ikincil dentritik kollarla bakırca zengin bölgelerin oluşmasına neden olmuştur.

Şekil 4, CoCrFeNiCu SEM ve EDS görüntülerine göre mikroyapıda dentrit sınırlarındaki Cu elementinin içeriği, içerdeki tane içinden daha yüksektir. Bu durum daha önce de açıklandığı üzere Cu atomlarının açıkça dendritler arasındaki bölgelerde yoğunlaştığını gösterir. Mikroyapıda

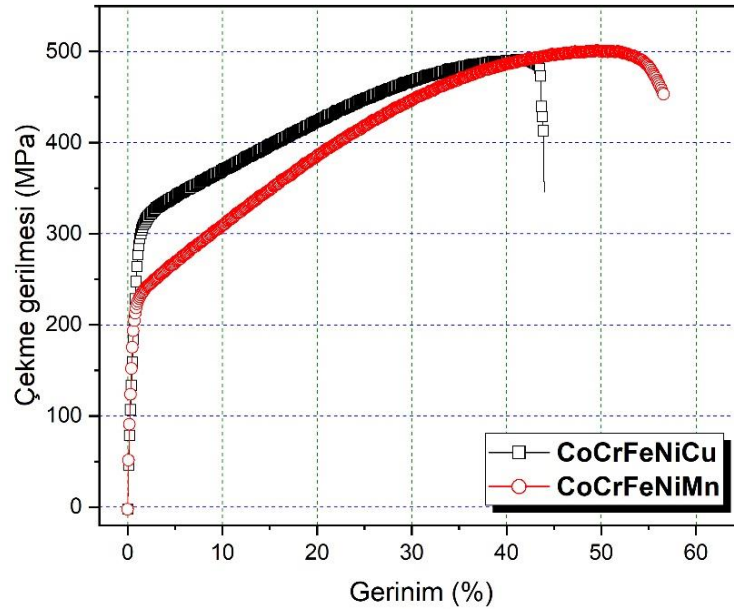
görülen bu durum iki açıdan açıklanabilir. Bir yandan, Cu'nun erime noktası, döküm halinde CoCrFeNiCu alaşımındaki diğer dört elementten (Co, Cr, Fe ve Ni) en düşüğüdür ve Cu elementinin ergimesi diğer elementlerden daha sonra gerçekleşir. Bu nedenle, döküm halinde CoCrFeNiCu alaşımının ergimesi sırasında, Cu elementinin dentrit sınırında yoğunlaşması daha kolaydır ve bu nedenle mikroyapıda Cu segregasyonu gerçekleşir. Diğer yandan, Gibbs serbest enerjisi $\Delta G = \Delta H - \Delta T \cdot \Delta S$ (burada ΔG Gibbs serbest enerjisi, ΔH karışım entalpisini, ΔT sıcaklık ve ΔS karışım entropisini) için bilindiği üzere, daha küçük entalpi ve daha büyük entropi Gibbs serbest enerjisini azaltmaya yarar ve bu nedenle daha stabil bir malzeme oluşur. Tablo 2, Co, Cr, Fe ve Ni'nin dört elementinin karıştırma entalpisinin negatif olduğunu ve Cu ile diğer dört element arasındaki karıştırma entalpisinin pozitif olduğunu açık bir şekilde gösterir. Daha küçük karıştırma entalpisini, daha düşük Gibbs serbest enerjisi ve daha stabil sisteme yol açar [28]. Bu nedenle, Co, Cr, Fe ve Ni için sistemin daha düşük serbest enerjisi nedeniyle stabil faz oluşması kolaydır. Ancak Cu için diğer elementlerle stabil faz oluşturmak daha zordur çünkü daha yüksek Gibbs serbest enerjisi ve bu nedenle, Cu'nun dentrit sınırlarında segregasyonu çok daha kolaydır. Bu iki nedenle, döküm halinde CoCrFeNiCu alaşımındaki Cu elementi dentrit sınırında segregasyon olmuştur.



Şekil 4. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen CoCrFeNiMn YEA EDS analizi (YEA EDS analysis of CoCrFeNiMn produced by vacuum arc melting method)

Genellikle bir alaşımın mekanik özellikleri, kimyasal bileşime yeni eklenen elementler tarafından değiştirilebilir. İkame veya dop olarak kullanılan elementler genellikle atom boyutu farkının, latis (kristal) sabitinin ve dislokasyonların kayma düzlemindeki hareket direncinin artmasına neden olur. Eklenen yeni elementlerin atom yarıçapı, Cr, Mn, Fe, Co ve Ni atomlarının yarıçapından önemli ölçüde farklıdır. Bu fark YEA'larda latis distorsiyonu fenomeni doğrudan kanıtlanmıştır. Son yıllarda, bazı araştırmacılar CoCrFeNiCu YEA [18,29] üzerine ilgili araştırmalar yürütmüşlerdir. Örneğin, Zhang ve ark. [29], CoCrFeNiCu alaşımının kaplama malzemesi olarak mükemmel bir termal stabilizeye sahip olduğunu ve 1000 °C'ye kadar herhangi bir faz dönüşümü olmadığını bulmuşlardır, ancak ilgili mekanik özellikler rapor edilmemiştir. Şekil 5'de CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu yüksek entropili alaşımlara ait mekanik özellikler verilmiştir. Her iki alaşım için oluşturulan gerilme-gerinim eğrileri, mikroyapıda ana bir katı bir çözelti fazın yanında ikinci bir katı çözelti fazın oluşturulmasının mekanik özellikler etkisini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Gerilme-%uzama eğrisinden elde edilen akma dayanımı, çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler Tablo 3'de gösterilmiştir. Her iki alaşıma ait gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde hem gerilme hem de gerinim özelliklerinde Mn yerine eklenen Cu YEA'nın maksimum çekme gerilmesinde önemli bir değişime yol açmazken alaşımın akma ve gerinim değerlerinde önemli değişiklikler gerçekleşmiştir. CoCrFeNiMn alaşımının maksimum çekme gerilmesi 501 MPa iken CoCrFeNiCu alaşımının maksimum çekme gerilmesi 491 MPa olarak

bulunmuştur. Her iki alaşımın akma dayanımları karşılaştırıldığında Mn'lı CoCrFeNiMn alaşım için 212 MPa, Cu'lı CoCrFeNiCu alaşım için 290 MPa olarak hesaplanmıştır. Mn yerine eklenen Cu ile akma dayanımındaki bu artışın temel sebebi olarak alaşımın mikroyapısı gösterilebilir. Cu'lı alaşımın mikroyapıda görülen Cu'ca zengin ikinci bir YMK fazın oluşması akma dayanımının yükseltmesine neden olmuştur. Her iki alaşımın gerinimleri karşılaştırıldığında Mn ve Cu yer değiştirmesiyle birlikte azaldığı görülmektedir. CoCrFeNiMn için ölçülen %56,67 gerinimi CoCrFeNiCu alaşımında %43,97'ye azalmıştır. CoCrFeNiCu alaşımını CoCrFeNiMn alaşımının mikroyapısıyla karşılaştırıldığında iki faz içerir. Bunlar, CoCrFeNiCu YMK fazı ve bakırca zengin YMK fazıdır. Bu mikroyapı oluşumu mekanik özelliklerin değişmesine neden olur. Söyleki, CoCrFeNiCu YEA faz oluşumu sırasında bakırın karışım entalpisi etkisi ve bakırın diğer elementlere göre daha yüksek difüzyon katsayısına sahip olması iki fazlı mikroyapının oluşmasına neden olmuştur. Cu ve diğer elementler Co, Cr, Fe ve Ni arasındaki karıştırma entalpileri sırasıyla +6, +12, +13 ve +4 kJ/mol'dür [33] Bu, Cu'nun diğer elementlerle termodinamik olarak karışmasının zor olacağı anlamına gelir ve bu nedenle mikroyapıda Cu'nun segregasyon olmasına neden olur [30]. Cu'nun difüzyon katsayısının diğer elementlerden daha yüksek olduğu literatürdeki diğer çalışmalarda rapor edilmiştir, bu sıvı alaşımda solidifikasyon sırasında Cu'nun ikinci bir faz olarak mikroyapıda oluşumuna neden olur [8,31]. Mikroyapıda meydana gelen bu ikinci faz alaşımın akma dayanımını yükseltirken gerinimin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5. CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu YEA'ların çekme gerilme-gerinim eğrileri (Tensile stress-strain curves of CoCrFeNiMn and CoCrFeNiCu YEA's)

Tablo 2. Farklı atomların kimyasal karışım entalpisi değerleri (Chemical mixing enthalpy values of different atoms)

Element	Co	Cr	Fe	Ni
Cu	6	12	13	4
Co	-	-4	-1	0
Cr	-	-	-1	-7
Fe	-	-	-	-2

Tablo 3. CoCrFeNiMn ve CoCrFeNiCu YEA'ların mekanik özellikleri (Mechanical properties of CoCrFeNiMn and CoCrFeNiCu YEA's)

Alaşım	Maksimum çekme gerilmesi	Akma Gerilmesi	Çekme Uzaması
	MPa	MPa	%
CoCrFeNiMn	501	212	56,67
CoCrFeNiCu	491	290	43,97

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Cantor yüksek entropili alaşımında (YEA) bulunan mangan elementinin neden olduğu yavaş difüzyon etkisini azaltarak mikroyapıda farklı katı çözümleri oluşturmak amacıyla Mn yerine Cu elementi eklenen CoCrFeNiCu YEA vakum ark ergitme yöntemiyle başarıyla üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde

elde edilen önemli bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bakırın diğer elementler içerisindeki difüzyon oranının daha yüksek olması mangan içeren yüksek entropili alaşıma göre daha stabil bir yapının olmasını sağlamıştır.
- Cantor alaşımın bileşiminde bulunan mangan metali yerine eş atomik oranda bakır eklenmesi yapıda YMK yapılı ikinci bir katı çözümleri fazını oluşturmuştur. Bununla birlikte Mn ve Cu difüzyon oranlarının birbirinden farklı olmasından dolayı dentritik yapı görülmüştür.
- Mangan yerine eklenen bakır metali pozitif karışım entalpisine sahip olduğundan mikroyapıda bakırca zengin katı çözümleri fazlarını oluşturmuştur.
- Mangan yerine bakır metali eklenmesi akma dayanımı yükseltirken gerinim değerinin düşmesine neden olmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP) birimi tarafından FYL-2020-9238 proje numarasıyla desteklenmiştir. Bu desteklerinden dolayı KTÜ-BAP birimine yazarlar olarak teşekkürlerimizi sunuyoruz.

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)

Kürşat İÇİN: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Sefa Emre SÜN BÜL: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Ataberk YILDIZ: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Yang, X. and Y. Zhang, Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 2012. 132(2): 233-238.

[2] Du, L.M., et al., Effects of temperature on the tribological behavior of Al_{0.25}CoCrFeNi high-entropy alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019. 35(5): 917-925.

[3] Zhang, H., et al., Application Prospects and Microstructural Features in Laser-Induced Rapidly Solidified High-Entropy Alloys. *JOM*, 2014. 66(10): 2057-2066.

[4] Zhang, C., et al., Strong and ductile FeNiCoAl-based high-entropy alloys for cryogenic to elevated temperature multifunctional applications. *Acta Materialia*, 2023. 242: 118449.

[5] Gao, T., et al., Molecular dynamics simulations of tensile response for FeNiCrCoCu high-entropy alloy with voids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023. 237: 107800.

[6] Andrade, G., et al., Crystal structure and hydrogen storage properties of AB-type TiZrNbCrFeNi high-entropy alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.

[7] Xiao, G., et al., Superconductivity with large upper critical field in noncentrosymmetric Cr-bearing high-entropy alloys. *Scripta Materialia*, 2023. 223: 115099.

[8] Meng, C., et al., Effect of Cu content on microstructure and properties of CoCrFeNiCux high-entropy alloy coatings prepared by induction cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023. 934: 167896.

[9] Xiong, W., et al., Refractory high-entropy alloys: A focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023. 142: 196-215.

[10] Otto, F., et al., The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2013. 61(15): 5743-5755.

[11] Öztürk, S., et al., Effect of titanium addition on the corrosion behavior of CoCuFeNiMn high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022. 903: 163867.

[12] Shahmir, H., et al., Effect of annealing on mechanical properties of a nanocrystalline CoCrFeNiMn high-entropy alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*, 2016. 676: 294-303.

[13] Xing, Y., et al., Revealing strengthening contribution of grain refinement and phase precipitation in CrMnFeCoNi high-entropy alloy prepared from different powders. *Materials Science and Engineering: A*, 2022. 860: 144297.

[14] Liu, B., et al., Effect of cold working and annealing on microstructure and properties of powder metallurgy high entropy alloy. *Science China Technological Sciences*, 2018. 61(2): 197-203.

[15] Šebesta, J., K. Carva, and D. Legut, Evolution of the Curie temperature for a substituted Cantor alloy. *Physical Review B*, 2021. 103(6): 064407.

- [16] Cantor, B., Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 2021. 120: 100754.
- [17] Erdogan, A., et al., Microstructure, wear and oxidation behavior of AlCrFeNiX (X = Cu, Si, Co) high entropy alloys produced by powder metallurgy. *Vacuum*, 2021. 187: 110143.
- [18] Oh, S.M. and S.I. Hong, Microstructure and Mechanical Properties of Equitomic CoCrFeCuNi High Entropy Alloy. *Key Engineering Materials*, 2018. 765: 149-154.
- [19] Qin, G., et al., Microstructures and mechanical properties of Nb-alloyed CoCrCuFeNi high-entropy alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018. 34(2): 365-369.
- [20] Sünbül, S.E., et al., Determination of structural, tribological, isothermal oxidation and corrosion properties of Al-Co-Cr-Fe-Ni-Ti-Cu high-entropy alloy. *Vacuum*, 2021. 187: 110072.
- [21] Li, Z., Interstitial equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloys: carbon content, microstructure, and compositional homogeneity effects on deformation behavior. *Acta Materialia*, 2019. 164: 400-412.
- [22] Miracle, D.B. and O.N. Senkov, A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017. 122: 448-511.
- [23] Anand, G., R. Goodall, and C.L. Freeman, Role of configurational entropy in body-centred cubic or face-centred cubic phase formation in high entropy alloys. *Scripta Materialia*, 2016. 124: 90-94.
- [24] Praveen, S., B.S. Murty, and R.S. Kottada, Alloying behavior in multi-component AlCoCrCuFe and NiCoCrCuFe high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2012. 534: 83-89.
- [25] Manzoni, A., et al., Investigation of phases in Al₂₃Co₁₅Cr₂₃Cu₈Fe₁₅Ni₁₆ and Al₈Co₁₇Cr₁₇Cu₈Fe₁₇Ni₃₃ high entropy alloys and comparison with equilibrium phases predicted by Thermo-Calc. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013. 552: 430-436.
- [26] Choi, W.-M., et al., Design of new face-centered cubic high entropy alloys by thermodynamic calculation. *Metals and Materials International*, 2017. 23(5): 839-847.
- [27] Veerappan, G., et al., Effect of Copper on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Powder Metallurgy Processed Ni-Co-Cr-Fe-Mn-Cu_x High Entropy Alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022.
- [28] Takeuchi, A. and A. Inoue, Calculations of mixing enthalpy and mismatch entropy for ternary amorphous alloys. *Journal of Materials Transactions*, 2000. 41(11): 1372-1378.
- [29] Zhang, H., et al., Thermally stable laser clad CoCrCuFeNi high-entropy alloy coating with low stacking fault energy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. 600: 210-214.
- [30] Thangaraju, S., T.E. Bouzy, and A. Hazotte, Phase Stability of a Mechanically Alloyed CoCrCuFeNi High Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 2017. 19(8).
- [31] Zhang, D., C. Kenel, and D.C. Dunand, Microstructure and mechanical properties of 3D ink-extruded CoCrCuFeNi microlattices. *Acta Materialia*, 2022. 238: 118187.

R&D Unit Process Analysis in a Furniture Business

Burak KILCI¹  Kemal YILDIRIM^{2*}  Kadir Cem TUĞCU³ 

^{1,3} Ersa Mobilya, Sincan Organize Bölgesi, 06930, Sincan, Ankara, Turkey

² Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/03/2023
Revision: 28/04/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

R&D Center
Furniture
Production
Process Analysis
Work Flow Diagram

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/03/2023
Düzeltilme: 28/04/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Ar-Ge Merkezi
Mobilya
Üretim
Süreç Analizi
İş Akış Diyagramı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the R&D process projection of Ersa furniture, which has an R&D center and a design center, was drawn and the current situation analysis was made. / Bu çalışmada, Ar-Ge Merkezi ve Tasarım Merkezi bulunan Ersa Mobilyanın üretim tesislerine ilişkin Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizi yapılmıştır.

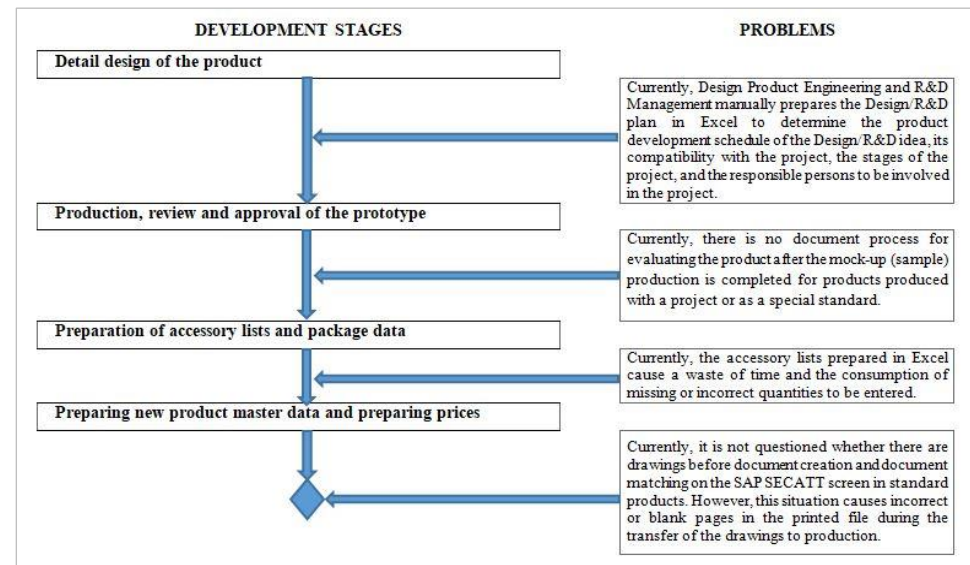


Figure A: Issues that are repetitive and/or negatively affecting the R&D process. / Ar-Ge sürecinde tekrar eden ve/veya süreci olumsuz etkileyen hususlar.

Highlights (Önemli noktalar)

- Process analysis in furniture businesses. / Mobilya işletmelerinde süreç analizi.
- Stage threshold method. / Aşama eşiği yöntemi.
- Work flow diagram in furniture enterprises. / Mobilya işletmelerinde iş akış şeması.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to analyze the whole process of the design, prototype production, mass production, assembly, order and delivery of the products included in the program in a large furniture company with an R&D center and to determine the issues that may adversely affect the process. / Bu çalışmada, Ar-Ge merkezi bulunan bir büyük mobilya işletmesinde programa alınan ürünlerin tasarımı, prototip üretimi, seri üretimi, montajı, siparişi ve teslim edilmesi aşamalarına ilişkin tüm sürecin analizlerinin yapılması ve süreci olumsuz yönde etkileyebilecek hususların belirlenmesi amaçlanmaktadır. /

Originality (Özgünlük): The projection of the R&D process and the current situation analyzes constitute the original aspect of the research. /Yapılan Ar-Ge süreci izdüşümü ve mevcut durum analizleri araştırmanın özgün yanını oluşturmaktadır.

Results (Bulgular): The projection of the R&D process of the researched enterprise was drawn and the current situation analyzes were made. / Araştırma yapılan işletmenin Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizleri yapılmıştır.

Conclusion (Sonuç): The work flow diagram created as a result of the analyzes was studied, and the repetitive issues that negatively affected the process were determined. Finally, necessary arrangements have been made regarding these issues, and alternative solutions have been proposed to improve the process. / Yapılan analizler sonucu oluşturulan iş akış diyagramı üzerinde çalışılmış, tekrar eden ve süreci olumsuz yönde etkileyen hususlar belirlenmiştir. Son olarak da, bu hususlara ilişkin gerekli düzenlemeler yapılmış, sürecin iyileştirilmesi için alternatif çözüm önerileri sunulmuştur.



Bir Mobilya İşletmesinde Ar-Ge Birimi Süreç Analizi

Burak KILCI¹ Kemal YILDIRIM^{2*} Kadir Cem TUĞCU³

^{1,3} Ersu Mobilya, Sincan Organize Bölgesi, 06930, Sincan, Ankara, Turkey

² Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/03/2023
Düzeltilme: 28/04/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Ar-Ge Merkezi
Mobilya
Üretim
Süreç Analizi
İş Akış Diyagramı

Öz

Bu çalışmada, Ar-Ge merkezi bulunan bir büyük mobilya işletmesinde programa alınan ürünlerin tasarımı, prototip üretimi, seri üretimi, montajı, siparişi ve teslim edilmesi aşamalarına ilişkin tüm sürecin analizlerinin yapılması ve süreci olumsuz yönde etkileyebilecek hususların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Buna göre, tüm sürecin hatasız ve verimli olacak şekilde işleyebilmesi için gerekli düzenlemeler yapılacak ve çözüm önerileri sunulacaktır. Bu maksatla, Sincan Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Ersu Mobilya araştırma ortamı olarak seçilmiş olup, işletmenin fabrika yerleşkesinde faaliyet gösteren Ar-Ge merkezinde iş süreç analizi çalışmaları yapılmıştır. Sonuçta, işletmenin Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizleri yapılmıştır. Buna göre, analizler sonucu oluşturulan iş akış diyagramı üzerinde çalışılmış, tekrar eden ve süreci olumsuz yönde etkileyen hususlar belirlenmiştir. Son olarak da, bu hususlara ilişkin gerekli düzenlemeler yapılmış, sürecin iyileştirilmesi için alternatif çözüm önerileri sunulmuştur.

R&D Unit Process Analysis in a Furniture Business

Article Info

Research article
Received: 28/03/2023
Revision: 28/04/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

R&D Center
Furniture
Production
Process Analysis
Work Flow Diagram

Abstract

In this study, it is aimed to analyze the whole process of the design, prototype production, mass production, assembly, order and delivery of the products included in the program in a large furniture company with an R&D center and to determine the issues that may adversely affect the process. Accordingly, necessary arrangements will be made and solutions will be presented in order for the entire process to run flawlessly and efficiently. For this purpose, Ersu Furniture, located in the Sincan Organized Industrial Zone, was chosen as the research environment, and business process analysis studies were carried out in the R&D center located in the factory campus of the enterprise. As a result, the projection of the R&D process of the enterprise was drawn and the current situation analyzes were made. Accordingly, the work flow diagram created as a result of the analyzes was studied, and the repetitive and negative effects of the process were determined. Finally, necessary arrangements have been made regarding these issues, and alternative solutions have been proposed to improve the process.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de mobilya işletmelerinin ulusal imalat sanayi içindeki yeri ve önemi gün geçtikçe artarak devam etmektedir [1]. TÜİK verilerine göre, mobilya sektörü imalat sanayinin işletme bazında %9,6’sını ve istihdam bazında ise %4,8’ini oluşturmaktadır [2]. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı verilerine göre, sektörde 16 adet Ar-Ge Merkezi ve 19 adet Tasarım Merkezi bulunmaktadır. 2018 yılında mobilya sektörü 3,1 milyar dolar döviz girdisi sağlamış, 2,3 milyar dolar dış ticaret fazlası vermiş, 2023 yılı için ise 6 milyar dolar civarında ihracat hedefi oluşturmuştur [3,4]. Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge), kaliteli inovatif ürünlerin ve üretim planlama süreçlerinin ortaya çıkarılabilmesi

için planlı olarak yapılan kapsamlı faaliyetlerdir [5]. Türkiye’de Ar-Ge faaliyetlerinin yetersizliği, güncel olmayan üretim şekilleri, hatalı pazarlama taktikleri, verimsiz üretim teknikleri, uluslararası standartlara uygun üretim yapılamaması ve özellikle Avrupa Birliği’ni oluşturan ülkelere oranla daha düşük teknolojiye sahip olunması üretim kaynaklı sorunlar olarak ortaya çıkmaktadır [6].

Bilimsel ve teknolojik alanlardaki gelişmeler, tüketici taleplerindeki artış, yurtiçi ve yurtdışı rekabet artışları gibi nedenler, işletmelerin yenilik yapmalarını zorunlu hale getirmekte ve sonuçta yeniliklerin ortaya konulması, takip edilmesi, uygulanabilmesi için Ar-Ge faaliyetlerinin işletmelerde yer alması sağlamaktadır [7].

Ar-Ge, bilim ve teknolojinin altyapısını oluşturmakta olup, mevcut ürünlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesinde, işletmelerin varlıklarını sürdürebilmelerinde temel bir işlev olarak ortaya çıkmaktadır [8]. Ar-Ge, yeni bir ürünün tasarlanması ve üretilmesi, ürün kalitesinin / standardının yükseltilmesi, maliyeti azaltıcı ve standarttı yükseltici tekniklerin uygulanması, mevcut teknolojilerin iyileştirilmesi, yeni bir teknolojinin ülkeye uyumunun sağlanması ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi için yapılan, bilimsel ölçütlere uygun şekilde yürütülen ve tüm aşamaları tanımlanmış çalışmaların sonuçlarını içermektedir. Bu tanım, ülkenin kalkınması için mihenk taşı olan ekonomik faaliyetlerin gelişmesini ve büyümesini, rekabet gücünün ve refah seviyesinin artırılmasını ve sosyal gelişmenin sürekli bir şekilde iyileşmesini ifade eder [9].

Yeni ürün geliştirme (YÜG) sürekli iyileştirilmesi Ar-Ge faaliyetleriyle sağlanabilir. Ar-Ge, işletmelerin finansman, yönetim, tedarik, pazarlama vb. faaliyetlerini etkileyen, sonuçta işletmelerin sürekliliği ve kârlılığını belirleyen önemli bir süreçtir [10]. Yeni ürün geliştirme, işletmelerin özgün, gelişmiş, yenilenmiş ve farklılaştırılmış, kalite sürecine göre biçimlenmiş kaliteli bir ürünün pazara sunulması ve kullanımının yaygınlaşması için devamlılık sağladığı, müşteri katılımının öne çıktığı geniş kapsamlı bir olgu ve stratejik bir yönetim süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç, işletmelerin kendi iç kaynakları, yetenekleri, teknolojiyi kullanma şekilleri ve dış çevre faktörlerinden etkilenebilmektedir. Yeni ürün geliştirme süreci, yeni pazar bilgileri, yeni müşteri isteklerinin ve yaratılan fırsatların belirlenmesi ile başlamakta; ön kararlar, kavram geliştirme, projenin değerlendirilmesi, ürünün geliştirilmesi, test edilmesi, ticarileştirme aşamaları ve ürünün pazara sunumu ile sonlanmaktadır [11].

Yapılan araştırmalara göre, yeni ürün geliştirme süreci farklı ölçütlerde değerlendirmesi yapılan gelişim aşamalarından oluşmaktadır. Her bir gelişim aşaması sonucunda, bir sonraki aşamaya geçilirken durup sürecin değerlendirilmesinin yapıldığı noktalara aşama eşiği denilmektedir. Aşama eşikleri, yeni ürün geliştirme sürecinde bulunan aşamadan bir ileri aşamaya geçilip geçilmemesi için kullanılan bir değerlendirme formudur. Karar verilen belirli ölçütlere göre her bir aşama eşiğinde bulunan aşamadaki durum ve etkinlik irdelenir. Eğer mevcut durum, yeni ürün geliştirme sürecinde bir sonraki evreye geçmeye

uygun ise, süreçte ileri hareket edilir. Her bir aşama eşikleri, firmanın yeni ürün geliştirme stratejisine göre belirlenir. Aşama eşiği yöntemiyle yönetsel belirsizlik azalırken, kaynakların kullanımında etkinlik sağlanır [12].

Her bir işin veya her bir ürünün temel bir iş kapsamı vardır. Bundan anlaşılacak, kurumsal olarak her bir tekniğin en iyi şekilde uygulandığı, yani tasarım ve talimatların eksiksiz olduğu, üretim ya da işlem için gereken yöntemin tam olarak uygulandığı, çalışma sürecince herhangi bir nedene dayalı olarak çalışma zamanından kayıpların olmadığı bir zamanda, bir işin yapılması ya da bir ürünün imalatı için gerekli olan süredir. Bir başka ifadeyle, temel iş kapsamı, daha fazla azaltılması mümkün olmayan en düşük çalışma süresidir [13]. Bir başka deyişle; işçiler veya makineler tarafından yapılan iş veya üretim, temel iş kapsamındaki süreye ne kadar yakın bir sürede yapılmışsa, o işçilerin veya makinelerin verimliliği de o kadar yüksek olur [14].

Bir işletmenin verimliliğine etki eden zaman faktörleri, teknik ve beşeri olarak iki şekilde gruplanabilir. Burada ele alınan kayıp iş zamanına neden olan faktörler, konunun yönetsel, teknik ve beşeri yönünü ortaya koymaktadır. Üretim sürecinde oluşan iş zamanı kayıpları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [14,15];

1. Üründen kaynaklanan iş zaman kaybı,
2. Yöntemden kaynaklanan iş zaman kaybı,
3. Yönetimden kaynaklanan iş zaman kaybı,
4. İş görenden kaynaklanan iş zaman kaybı.

Ar-Ge birimi süreç analizi verimliliği artırmak, kapsam, zaman ve maliyet vb. konuları geliştirmek/iyileştirmek için oldukça önemlidir. Bu süreçte aksaklık oluşturan veya süreci yavaşlatan konular/maddeler tespit edilerek kalitenin iyileştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi bunların sonucunda ise verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi hedefidir. Verimliliğin tanımı, çıktının girdiye oranı olarak ifade edilebilir. Burada ifade edilen çıktı, üretilen mal veya hizmeti, girdi de bu mal veya hizmeti üretebilmek için kullanılan kaynakları ifade eder. Üretim hazırlık ve üretim sürecinde meydana gelen olaylar analiz edilip çıktıya değer katmayanlar ayıklanır ve olaylar yeniden düzenlenirse verimlilik de artmış olur.

Bu çalışmada, Ar-Ge merkezi ve tasarım merkezi bulunan Ersu mobilyanın Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizi yapılmıştır. Ersu mobilya mevcut iş akış şeması "Microsoft

Visio” programı aracılığıyla hazırlanmış, bu iş akış şemasında Ar-Ge sürecinin gelişim aşamaları ve aşama eşikleri belirlenmiştir. Bunun sonucunda süreçteki aksaklıklar belirlenmiş ve bu aksaklıkların oluşturduğu maliyet kayıpları hesaplanmıştır.

Süreç analizi; verimliliği artırmak, kapsam, zaman ve maliyet vb. konuları geliştirmek/iyileştirmek için oldukça önemlidir. Bu süreçte aksaklık oluşturan veya süreci yavaşlatan konular/maddeler tespit edilerek kalitenin iyileştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi hedeftir.

Bu çalışmada Mobilya üretimi yapılan Ar-Ge ve tasarım merkezi bulunan Ersu mobilyanın Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılarak mevcut durum analizinin yapılması, Ar-Ge sürecinde tekrar eden veya süreci olumsuz etkileyen konular/maddelerin tespit edilmesi ve bu maddelerde gerekli düzeltmeler veya çıkarmaların yapılarak süreç iyileştirilme çalışmalarının raporlanması amaçlanmaktadır.

2. YÖNTEM (METOD)

2.1. Ar-Ge Süreç Analizi (R&D Process Analysis)

Bu araştırmada, Ar-Ge Merkezi ve Tasarım Merkezi bulunan Ersu Mobilyanın üretim tesislerine ilişkin Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizi yapılmıştır. Ersu mobilya mevcut iş akış şeması “Microsoft Visio” programı aracılığıyla hazırlanmış, bu iş akış şemasında Ar-Ge sürecinin gelişim aşamaları ve aşama eşikleri belirlenmiştir.

Yapılan Ar-Ge süreç analizinde tekrar eden ve/veya süreci olumsuz etkileyen hususlar belirlenerek bu hususlara ilişkin sürecin iyileştirilmesine yönelik

öneriler geliştirilmiştir. Ar-Ge süreç analizi sistematik olarak aşağıdaki gibi ele alınmıştır.

Ersu Mobilya Ar-Ge Birimi Süreç Analizi

- Tasarımın gözden geçirilmesi
- Tasarım ihtiyaç ve talebinin belirlenmesi ve ilgili birime iletilmesi
- Ürün karakteristiğinin ve taslak ürün ailelerinin belirlenmesi
- Ürünün detay tasarımı
- Tasarımın değerlendirilmesi.

Ürün Prototip Süreç Analizi

- Prototip üretim dosyasının hazırlanması
- Prototip üretimi, tartışma ve karar verme
- Ürün standart yazısı ile tanıtım çizimlerinin oluşturulması
- Parça resimlerinin çizilmesi
- Aksesuar listeleri ve paket verilerinin hazırlanması
- Montaj resimlerinin hazırlanması
- Ürün anaverisinin yapılması ve maliyet hesabının çıkarılması.

2.2. Araştırma Ortamı (Research Environment)

Araştırmada Ersu mobilyanın merkez fabrika yerleşkesi Ar-Ge birimi ele alınmış olup; Ar-Ge biriminin kontrolünde yapılan süreç analizleri, iş akış şeması ve süreç iyileştirme çalışmaları sistematik olarak aşağıda raporlanmıştır.

Ersu mobilyanın yaklaşık 60 bin metrekare olan ve güncel üretim teknolojileriyle donatılmış tesisleri, tek vardiyada 4,5 milyon metrekare panel işleme, 500 bin metre tül laminat panel ve 530 bin parça mobilya üretme kapasitesine sahiptir (Şekil 1).

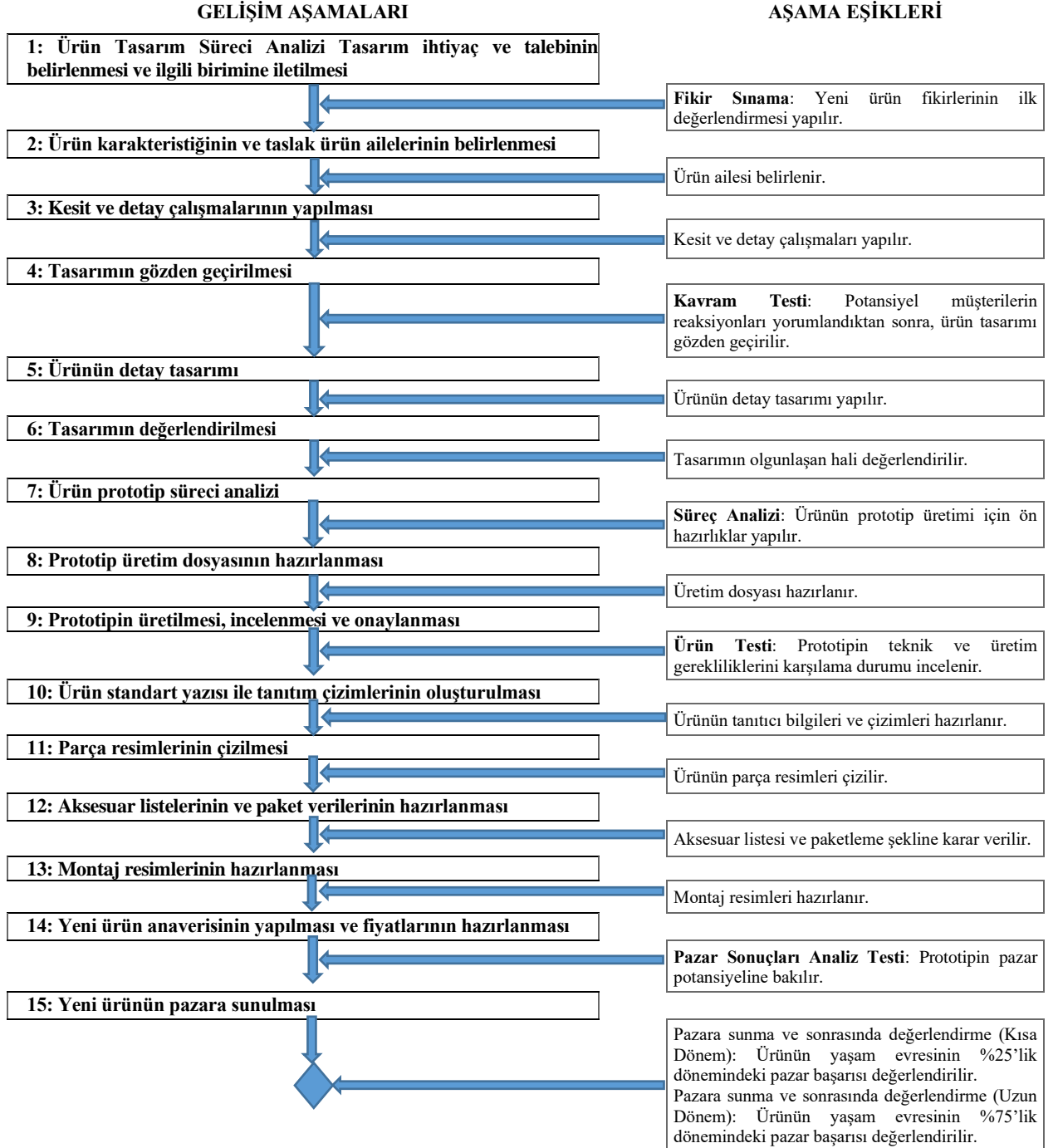


Şekil 1. Ersu mobilya üretim tesisleri (Ersu furniture production facilities)

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, daha önce Cooper [16], Hart ve ark. [17], Tzokas ve ark. [18] ve Cengiz ve ark. [12] tarafından yapılan çalışmalardan faydalanılarak Ar-Ge merkezi ve tasarım merkezi bulunan Ersas mobilyanın Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılmış ve mevcut durum analizi yapılmıştır.

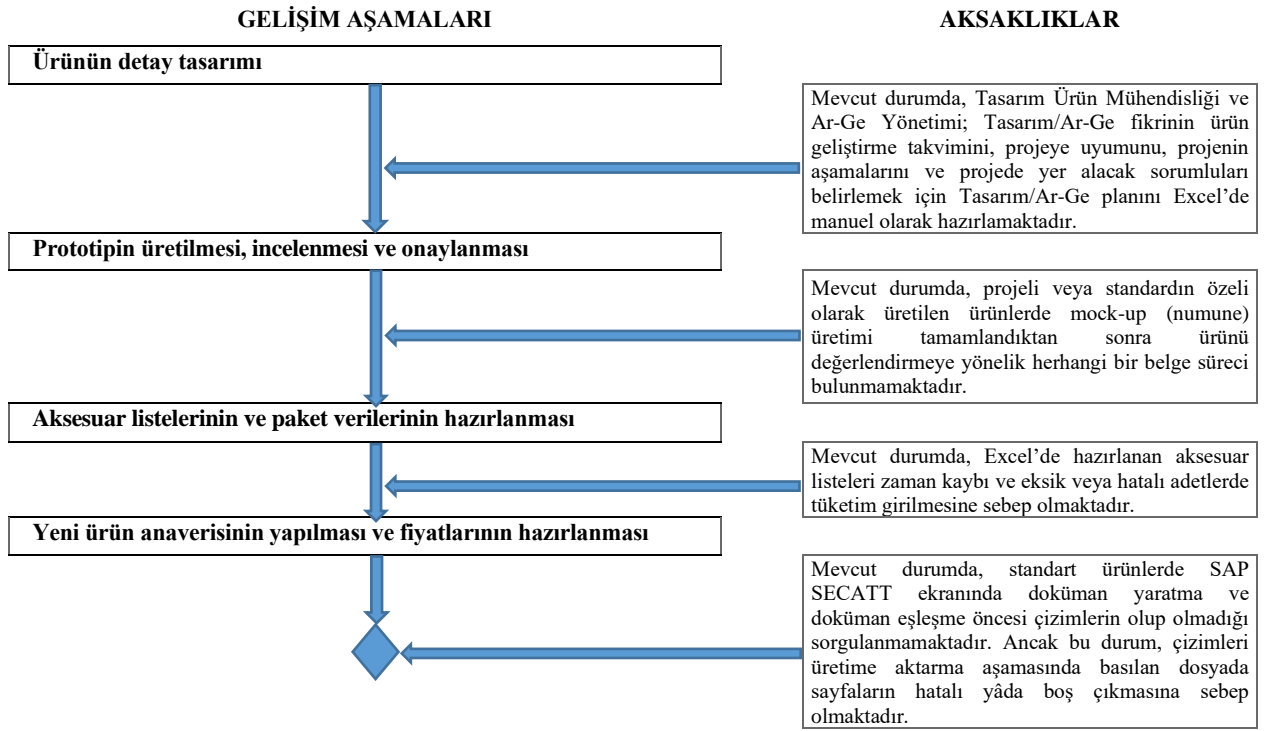
Ersas mobilyanın mevcut iş akış şeması “Microsoft Visio” programı aracılığıyla hazırlanmış, bu iş akış şemasında Ar-Ge sürecinin gelişim aşamaları ve aşama eşikleri Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de görüleceği üzere, Ar-Ge ürün geliştirme süreci genel olarak 15 gelişim aşamasından oluşmaktadır. Her bir aşamada yeni ürün geliştirme sürecine devam edilip edilmeyeceğine karar verilecek olan aşama eşikleri bulunmaktadır.



Şekil 2. Yeni ürün geliştirme aşamaları ve aşama eşikleri (New product development stages and stage thresholds)

Şekil 2’de verilen 15 gelişim aşamasından oluşan Ar-Ge sürecinde tekrar eden ve/veya süreci olumsuz etkileyen hususlar *aşama-eşiği yöntemi* kullanılarak *mevcut durum analizleri* yapılmış

olup, belirlenen hususları (aksaklıklar) içeren Ar-Ge sürecinin gelişim aşamaları Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Ar-Ge sürecinde tekrar eden ve/veya süreci olumsuz etkileyen hususlar (Issues that are repetitive and/or negatively affecting the R&D process)

Şekil 3'te görüleceği üzere, Ar-Ge sürecinde tekrar eden bir sonuca rastlanmamış, süreci olumsuz etkileyen hususlar ise *aşama-eşiği yöntemiyle* tespit edilmiştir. Aşama eşiği yönteminin tanımı ve açıklamaları tezin giriş kısmında verilmiştir. Bu hususlar aşağıdaki gibi dört başlık altında ele alınmış olup, gerekli düzeltmeler ve/veya çıkarmalar ile sürecin iyileştirilmesine yönelik tespitler "sonuç ve öneriler" kısmında detaylı olarak ele alınmıştır.

1. Standart ürünlerde tasarım-Ar-Ge planlarının hazırlanması:

Mevcut durumda, Tasarım Ürün Mühendisi ve Ar-Ge Yönetimi; Tasarım / Ar-Ge fikrinin ürün geliştirme takvimini, projeye uyumunu, projenin aşamalarını ve projede yer alacak sorumluları belirlemek için Tasarım / Ar-Ge planını Excel'de manuel olarak hazırlamaktadır. Bunun yerine, proje yönetim programlarından biri alınarak daha verimli ve etkili bir sistem oluşturulması sağlanabilir.

2. Numune imalatı kontrol ve değerlendirme formlarının bulunması:

Mevcut durumda, numune (mock-up) üretimi tamamlandıktan sonra ürünü değerlendirmeye yönelik herhangi bir belge süreci bulunmamaktadır. Bunun yerine, prototip sürecinde olduğu gibi Numune Değerlendirme ve Geliştirme Formu sürece dahil edilebilir.

3. Aksesuar listelerinin hazırlanması:

Mevcut durumda, kullanılan Excel aksesuar listeleri, eksik ve/veya hatalı sayıda tüketim girilmesine ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bunun yerine, 3D model hazırlanırken montaja, aksesuar kütüphanesinden seçilen aksesuarlar eklenip, net resim alındıktan sonra ürün ağacı (BOM / Bill of material) çekilip resme eklenebilir. Böylece hata yapma olasılığı ortadan kalkacak ve zamandan da kazanç sağlanmış olunacaktır.

4. Ürünlerde doküman yaratma ve eşleme sorgulaması:

Mevcut durumda, standart ürünlerde doküman yaratma ve doküman eşleşme öncesi çizimlerin olup olmadığı sorgulanmamaktadır. Ancak bu durum, çizimleri üretime aktarılma aşamasında basılan dosyada sayfaların hatalı ya da boş çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yerine, iş akış şemasında dosya basma aşaması öncesinde resimlerin varlığını kontrol eden bir aşama daha eklenebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, mobilya tasarımı ve üretimi yapılan, Ar-Ge merkezi ve tasarım merkezi bulunan Ersan mobilyanın Ar-Ge süreci izdüşümü çıkarılarak mevcut durum analizi yapılmış, "Microsoft Visio" programı aracılığıyla hazırlanan bu iş akış şemasında Ar-Ge sürecinde tekrar eden ve/veya

süreci olumsuz etkileyen hususlar belirlenmiştir. Bu çerçevede, eski durumun zamanı ve yeni durumun zamanı karşılaştırılarak maliyete dönüştürülmüş, işçilik ve harcamalarla bağ kurularak aşağıda tartışılmıştır.

Standart Ürünlerde Tasarım-Ar-Ge Planlarının Hazırlanması

Mevcut durumda, Tasarım Ürün Mühendisliği ve Ar-Ge Yönetimi; Tasarım / Ar-Ge fikrinin ürün geliştirme takvimini, projeye uyumunu, projenin aşamalarını ve projede yer alacak sorumluları belirlemek için Tasarım / Ar-Ge planını Excel'de manuel olarak hazırlanmaktadır. Bu durum, zaman ve maliyet açısından kayıp oluşturmaktadır. Oluşan bu kayıpları gidermek için her bir proje

numaralandırılıp, ürün Ar-Ge aşamalarının her biri zorluk derecelerine göre puanlanıp, planlanan teslim tarihleri gerçekçi bir şekilde sonuçlandırılabilir. Bu puanlama sistemiyle hem çalışanın performansı denetlenebilir, hem de oluşabilecek zaman kayıplarının önüne geçilebilir. Açılan her bir proje için 1-4 arasında zorluk derecesi belirlenip, buna göre bir tablo oluşturulmuştur (Tablo 1). Bu tabloda her bir zorluk katsayısına karşılık gelecek süreçler tanımlanmıştır. Tablo, tasarım geliştirme süreci, prototip üretim süreci, tasarım çıktıları süreci ve ürünü geçerli kılma süreçleri ve tüm bu süreçlerin alt kırılımlarını içermektedir. Bunun için, parça resimlerinin hazırlanması aşamasında ürün yöneticisinin gereceği bilgiye göre oluşturulan puanlama tablosu önerisi aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Parça resimlerinin hazırlanması aşamasında kullanılacak puanlama tablosu (The scoring table to be used in the preparation of the part drawings)

Parça Resimlerinin Hazırlanması Bazında Ürün Yöneticisinin Girdiği Bilgiye göre Puanlama												
ÜRÜN TİPİ		Kat Sayısı	Puanı	Ürün Varyantı		Varyant Puanı	Parça Resim Sayısı		Parça Resim Sayı Puanı	Cnc Program Sorgulaması	Cnc Program Sorgulama	
DOLAP,KİTAPLIK,VE KONSOLLAR	<input type="checkbox"/> Onay	6		AHŞAP GÖVDE	<input type="checkbox"/> Onay	1	0-30	<input type="checkbox"/> Onay	3	Yok	<input type="checkbox"/> Onay	0
				METAL GÖVDE	<input type="checkbox"/> Onay	3	31-60	<input type="checkbox"/> Onay	5	Var	<input type="checkbox"/> Onay	4
TOPLANTI MASASI	<input type="checkbox"/> Onay	12		ORTA AYAKLI	<input type="checkbox"/> Onay	1	0-30	<input type="checkbox"/> Onay	3	Yok	<input type="checkbox"/> Onay	0
				3 METREDEN UZUN	<input type="checkbox"/> Onay	3	31-60	<input type="checkbox"/> Onay	5	Var	<input type="checkbox"/> Onay	4
OPERASYONEL MASA	<input type="checkbox"/> Onay	24		KÜÇÜK ETAJERLİ	<input type="checkbox"/> Onay	2	0-30	<input type="checkbox"/> Onay	3	Yok	<input type="checkbox"/> Onay	0
				BÜYÜK ETAJERLİ	<input type="checkbox"/> Onay	4	31-60	<input type="checkbox"/> Onay	5	Var	<input type="checkbox"/> Onay	4
YÖNETİCİ MASASI	<input checked="" type="checkbox"/> Onay	48		HAREKETLİ SÜMEN	<input checked="" type="checkbox"/> Onay	5	0-30	<input type="checkbox"/> Onay	3	Yok	<input type="checkbox"/> Onay	0
				AÇILI GÖVDE FORMU	<input checked="" type="checkbox"/> Onay	8	31-60	<input type="checkbox"/> Onay	5	Var	<input checked="" type="checkbox"/> Onay	4
				Toplam Puan							73	
Zorluk Derecesi	0-15		Çok Kolay	1 HAFTA								
	16-29		Kolay	2 HAFTA								
	30-49		Orta	3 HAFTA								
	50-69		Zor	4 HAFTA								
	70-100		Çok Zor	5 HAFTA								

Mevcut süreçte ürün yöneticisi, ürün ailesi için tüm süreçlerin zamanlarını kendi inisiyatifine göre belirlemekte ve iş planını buna göre oluşturmaktadır. Bunun yerine, geliştirilen bu tabloda ürün yöneticisi ve Ar-Ge yöneticileri zorluk katsayılarını birlikte belirleyerek planlanan tarihleri işleyeceklerdir.

Bu alternatif öneri, Ersu mobilya Ar-Ge merkezinde standarda alınmış ve tüm süreçleri tamamlanmış 16 modüllü, 214 adet parça resmi bulunan bir yönetici masası ürün ailesi incelenmiştir. Parça resimleri ürün yöneticisi tarafından 8 haftada tamamlanmıştır. Ancak puanlama sistemine göre planlanan süre 5 haftadan fazla olmamalıdır. Bu durumda, 3 haftalık bir zaman kaybı olduğu tespit edilmiştir. Ersu mobilyada bir Ar-Ge çalışanın Aralık 2022 tarihinde saatlik ücreti 88 TL olarak

hesaplanmıştır. Ersu Mobilya haftalık 45 saat çalışma yapmaktadır. Bununla ilgili maliyet çalışması verilen değerler üzerinden hesaplanmıştır.

Bir ürün ailesi için: 3 hafta x 45 saat = 135 saat zaman kaybını ifade eder.

135 saat x 88 TL = 11.880 TL zararı ifade etmektedir.

Ersu mobilyada bir Ar-Ge personeli yılda ortalama 4 standart ürün ailesi çalışmaktadır. Ersu mobilya Ar-Ge biriminde standart ürün üzerine çalışan 15 personel bulunmaktadır. Bu personellerin mevcut süreç üzerinden ilerlediklerinde verilen örnekteki gibi 3 hafta zaman kaybıyla çalıştıkları varsayımından hareketle maliyet hesaplandığında;

11.880 TL x 15 personel x 4 ürün ailesi = 712.800 TL yıllık zararı ifade etmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Standart ürünlerde tasarım Ar-Ge planlarının yapılmasında mevcut durum ve önerilen durum arasındaki fark (The difference between the current situation and the proposed situation in making design R&D plans for standard products)

Aksesuar Listelerinin Hazırlanması	Çalışma Ücreti (Saat)	Yıllık Ortalama Standart ve Projeli Ürün Sayısı	İşlemler İçin Geçen Zaman	Yıllık Toplam
Mevcut Durum	88 TL	45 Adet	8 Hafta	1.900.800 TL
Alternatif Öneri	88 TL	45 Adet	5 Hafta	1.188.000 TL
Mevcut Durum ve Alternatif Öneri Arası Fark	88 TL	45 Adet	3 Hafta	712.800 TL

Sonuç olarak, hesaplanan maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, Ersu mobilya Ar-Ge biriminde oluşturulan alternatif tablonun kullanımına geçilmesine karar verilmiştir.

Numune İmalatı Kontrol ve Değerlendirme Formlarının Bulunması

Mevcut durumda, numune (mock-up) üretimi tamamlandıktan sonra ürünü değerlendirmeye yönelik herhangi bir belge süreci bulunmamaktadır. Müşteri üretilen numune ürünü üzerinde bir revizyon ya da köklü değişiklikler talep ettiğinde bu talepler projeyi yürüten çalışan veya çalışanlar tarafından dinlenip projeye işlenmektedir. Ancak bu çalışan veya çalışanların revizyonları projeye yanlış aktardığında üretilen üründe önemli hatalar oluşabilmekte ve bu hatalar maliyet artışlarına neden olabilmektedir. Bunun yerine, prototip sürecinde uygulanan *Prototip Değerlendirme ve Geliştirme Formu* ile aynı formatta *Mock-up Değerlendirme ve Geliştirme Formu* sürece dahil edilebilir. Bu süreç için örnek bir form hazırlanmıştır.

Numune olarak üretilen üründe kullanılan malzeme, malzeme miktarı, aksesuarlar ve ürün ölçüleri her bir tasarımda farklı olacağı için net bir maliyet çıkarmak mümkün olmayacaktır. Daha

önce Ersu mobilyada üretilen bir toplantı masası üzerinden ortalama bir maliyet çıkarılmıştır. Ersu mobilyada bir Ar-Ge çalışanın Aralık 2022 tarihinde saatlik ücreti 88 TL olarak hesaplanmıştır. Ersu mobilya haftalık 45 saat çalışma yapmaktadır. Bununla ilgili maliyet çalışması verilen değerler üzerinden hesaplanmıştır.

Özel bir banka projesinin numune değerlendirme toplantısında müşteri masa tablası üzerindeki priz kutularının konumunu kullanışlı bulmadığını belirtmiş ve priz kutularının konumunda değişiklik talep etmiştir. Ancak bu istek projeye hatalı işlenmiş ve bunun sonucunda masa tablası hatalı kesilmiş ve 1 plaka 30 mm lif levha malzeme, 10 metre 2x33 mm kenar bandı, 1 plaka yüz laminat ve 1 plaka astar laminat malzeme firesi oluşmuştur. Malzeme firesine ek olarak 6 saatlik iş gücü kaybı da oluşmuştur.

Aralık 2022 tarihindeki malzeme ve işçilik fiyatlarına göre maliyet hesabı yapıldığında, bu numune üretiminden 3.518 TL zarar edilmiştir.

Hesaplanan maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, Ersu mobilyada *Numune (Mock-up) Değerlendirme ve Geliştirme Formu* 'nun sürece dâhil edilmesine karar verilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Numune(Mock-up) değerlendirme ve geliştirme formu (Sample (Mock-up) evaluation and development form)

MOCK-UP DEĞERLENDİRME ve GELİŞTİRME FORMU		ersa		
ÜRÜN ADI				
BELGE NO				
DEĞERLENDİREN BİRİMLER	ACIKLAMA	İSİM	İMZA	TARİH
ÜRETİM				
panel				
cila				
metal				
döşeme				
TASARIM, ÜRÜN MÜHENDİSLİĞİ ve AR-GE				
SATINALMA VE PLANLAMA				
MÜŞTERİ İSTEKLERİ				
SATIŞ				
Ürün tasarım ve fonksiyon olarak hedeflenen kriterlere uygun mudur?	<input type="checkbox"/> EVET	<input type="checkbox"/> HAYIR		
NUMUNE ÜRÜN ÜZERİNDE YAPILMASI KARARLAŞTIRILAN REVİZYONLAR				
Mockup süreci yeniden başlatılmalı mıdır?	<input type="checkbox"/> EVET	<input type="checkbox"/> HAYIR		

Aksesuar Listelerinin Hazırlanması

Mevcut durumda, Excel’de hazırlanan aksesuar listeleri eksik veya hatalı tüketim sayılarının girilmesine ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bunun yerine, 3D model hazırlanırken montaja, aksesuar kütüphanesinden kullanılacak olan aksesuarlar eklenip, net resim alındıktan sonra ürün ağacı çekilip resme eklenebilir. Böylece oluşan hata ve hata yapma olasılığı ortadan kalkmış, zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olunacaktır.

Manuel aksesuar listesi hazırlanırken 15 modülü olan bir ürün ailesi ele alındığında; manuel olarak listelerin çıkarılması yaklaşık olarak 12 saat sürmektedir. Ersa mobilyada bir Ar-Ge çalışanın Aralık 2022 tarihi itibarıyla saatlik ücreti 88 TL olarak hesaplanmıştır.

$88 \times 12 = 1.056$ TL olarak hesaplanmıştır.

Otomatik aksesuar listesi hazırlanırken 15 modülü olan bir ürün ailesi ele alındığında; otomatik olarak listelerin çıkarılması yaklaşık olarak 0,5 saat süre

alacaktır. Ersa mobilyada bir Ar-Ge çalışanın Aralık 2022 tarihinde saatlik ücreti 88 TL olarak hesaplanmıştır. Bununla ilgili maliyet çalışması verilen değer üzerinden hesaplanmıştır.

$88 \times 0,5 = 44$ TL olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaba göre, otomatik aksesuar listesiyle çalışmak 15 modülü olan bir ürün ailesi için aylık yaklaşık 1.056 TL ($1056 - 44 = 1.012$ TL) kazanç sağlamıştır.

Ersa mobilya Ar-Ge biriminde 1 yılda ortalama 120 ürün ailesi (standart ve projeli işler toplamı) çalışılmaktadır. Çalışılan ürünlerin aksesuar listelerinin otomatik olarak hazırlanması yılda 121.440 TL ($1.012 \times 120 = 121.440$ TL) kazanç sağlamaktadır (Tablo 4).

Aynı zamanda aksesuar listelerinin hatasız ve eksiksiz iletilmesiyle malzeme planlama ve satın alma bölümlerinde oluşabilecek hataların önüne geçilmiş de olunacaktır. Böylece, eksik/fazla stok, hatalı olabilecek ve/veya gecikebilecek temin tarihleri engellenmiş olunacaktır.

Tablo 4. Aksesuar listelerinin hazırlanmasında mevcut durum ve önerilen durum arasındaki fark (The difference between the current state and the recommended state in the preparation of accessory lists)

Aksesuar Listelerinin Hazırlanması	Çalışma Ücreti (Saat)	Yıllık Ortalama Standart ve Projeli Ürün Sayısı	İşlemler İçin Geçen Zaman	Yıllık Toplam
Mevcut Durum	88 TL	120 Adet	12 Saat	126.720 TL
Alternatif Öneri	88 TL	120 Adet	0,5 Saat	5.280 TL
Mevcut Durum ve Alternatif Öneri Arası Fark	88 TL	120 Adet	11,5 Saat	121.440 TL

Sonuç olarak, hesaplanan bu maliyetler göz önüne alınmış ve sonraki süreçler için Ersa mobilya Ar-Ge biriminde otomatik aksesuar listesi kullanımına geçilmesine karar verilmiştir.

Ürünlerde Doküman Yaratma ve Eşleme Sorgulaması

Mevcut durumda, standart ürünlerde doküman yaratma ve doküman eşleşme öncesi çizimlerin olup olmadığı sorgulanmamaktadır. Bu durum, çizimleri üretime aktarma aşamasında basılan dosyada sayfaların hatalı ya da boş çıkmasına neden olmakta, acil durumlarda dosya parça resimsiz olarak basılıp üretime aktarılmakta, üretim planlama ve üretimde zaman kaybı oluşturmaktadır. Dosya üretime boş olarak aktarıldığında parçayı işleyecek olan operatör çizimi görememekte ve üretimi başlatamamaktadır. Bu durumda parça resmi sayısı, CNC’de işlenecek parça sayısı, malzeme cinsi ve malzeme ölçüleri

bilinmediği için standart ürünler içerisinde bir dosya dolabı seçilip bunun üzerinden yaklaşık maliyet minimum olarak hesaplanmıştır. Ersa mobilyada bir Ar-Ge çalışanın Aralık 2022 tarihinde saatlik ücreti 88 TL olarak hesaplanmıştır. Ersa mobilya haftalık 45 saat çalışma yapmaktadır. Bununla ilgili maliyet çalışması verilen değerler üzerinden hesaplanmıştır.

Bu durum üretim planlama ve üretimde referans alınan ürün için yaklaşık olarak birer saatlik iş gücü kaybı oluşturmaktadır. Bu süreç detaylı olarak incelendiğinde ayda ortalama 8 defa boş dosya basıldığı görülmüştür.

$88 \text{ TL} \times 2 \text{ saat} = 176 \text{ TL}$ ürün başı zarar

$176 \text{ TL} \times 8 \text{ defa} = 1.408 \text{ TL}$ aylık zarar

$1.408 \text{ TL} \times 12 \text{ ay} = 16.896 \text{ TL}$ yıllık zararı göstermektedir (Tablo 5).

Tablo 5. Doküman yaratma ve eşleme sorgulanmasında mevcut durum ve önerilen durum arasındaki fark (Difference between current state and suggested state in document creation and matching query)

Aksesuar Listelerinin Hazırlanması	Çalışma Ücreti (Saat)	Yıllık Ortalama Standart ve Projeli Ürün Sayısı	İşlemler İçin Geçen Zaman	Yıllık Toplam
Mevcut Durum	88 TL	2 Saat	8	16.896 TL
Alternatif Öneri	88 TL	0	0	0 TL
Mevcut Durum ve Alternatif Öneri Arası Fark	88 TL	2 Saat	8	16.896 TL

Bu zararı önlemek için iş akış şemasında dosya basma aşaması öncesinde resimlerin varlığını kontrol eden bir aşama daha eklenmesi önerilmiş ve ürün üretim planlama birimine ulaşmadan kontrolü Ar-Ge birimi içerisinde anaveri biriminde yapılabilecek hale getirilmiştir.

Sonuç olarak, hesaplanan maliyetler göz önünde bulundurulduğunda Ersu mobilyada dosya basma aşaması öncesinde resimlerin varlığını kontrol eden bir aşama daha eklenmesine karar verilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırmaya izin veren Ersu Mobilya'nın kurucusu ve yöneticileri Sn. Erol ATA, Sn. Erdem ATA ve Sn. Ercan ATA'ya, Kalite Müdürü Sn. Füsün ÇELEBİ'ye, yönlendirici bilgi ve önerileri ile katkı sunan Gazi Üniversitesi Öğretim Üyesi Sn. Prof.Dr. Erol BURDURLU'ya çok teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Burak Kılıcı: Ar-Ge süreç analizi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He made an R&D process analysis, analyzed the results and carried out the writing process of the article.

Kemal Yıldırım: Ar-Ge süreç analizi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He made an R&D process analysis, analyzed the results and carried out the writing process of the article.

Kadir Cem Tuğcu: Ar-Ge süreç analizi yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

He made R&D process analysis and analyzed the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Demir, B., Kazançoğlu, İ. Mobilya sektöründe yeni ürün geliştirme kararlarında müşteri katılımının önemi: Ofis mobilyaları üzerinde bir çalışma. Alanya Akademik Bakış. 2020; 4(2): 445-470.
- [2] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Mobilya sektör raporu. Sanayi Genel Müdürlüğü Sektör Bazlı Raporlar ve Analiz Serisi. 21 sayfa. 2020.
- [3] ORSIAD. Türk mobilya sektörü Fas üzerinden Batı ve Kuzey Afrika'ya açılacak. ORSIAD Orman Sanayi İş Adamları Gazetesi, Web: www.orsiad.com.tr, Son Erişim tarihi: 15.07.2019.
- [4] Sütçü, A., Karşıyaka, O., Burhan, M. E. Bir mobilya üretim tesisinde iş analizi ve benzetim uygulaması ile süreç verimliliğinin artırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2019; 17: 45-57.
- [5] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB). Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Destekleri Rehberi. 2004; 3: 10.
- [6] Çetin, T., Çolak, M., Gündoğdu, B. Kobi niteliğindeki işletmelerin Ar-Ge'ye verdikleri önem (Mobilya sektörü örneği). Yönetim, Ekonomi ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi. 2021; 5(6): 295-306.
- [7] Özsağır, Y. Ekonomide güven faktörü. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi. 2007; 6(20): 46-62.
- [8] Şimşek, M. Ş. Yönetim ve organizasyon, (7. Basım). Konya: Günay Ofset. 2002.
- [9] Ayhan, A. Düünden bugüne Türkiye'de bilim-teknoloji ve geleceğin teknolojileri, İstanbul: Beta Basım Yayım. 2002.

- [10] Freeman, C., Soete, L. *Yenilik iktisadi*. (Çev. Ergun Türkcan), 1. Baskı, Ankara: TÜBİTAK Yayınları. 2003.
- [11] Öztürk, D., Onurlubaş, E. Gıda sektöründe yeni ürün geliştirme: Konya'da bisküvi, çikolatalı ve şekerli mamuller alt sektörü üzerine bir uygulama. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*. 2018; 11(17): 551-568.
- [12] Cengiz, E., Ayyıldız, H., Kırkbir, F. Yeni ürün geliştirme sürecinde aşama-eşiği yöntemiyle süreç performans değerlemesi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*. 2010; 7(1): 435-452.
- [13] Timur, H. İş ölçümü, iş planlaması, verimlilik, kurumsal ve örnek uygulamalı. 2. Baskı. Ankara: Siyasal Kitabevi. 2005.
- [14] Çolak, M., Çetin, T., Güler, M. Büyük ölçekli bir mobilya işletmesinde verimliliğinin düşmesine yol açan iş zaman kayıplarının belirlenmesi. *EJONS International Journal*. 2021; 5(20): 878-888.
- [15] Demirbaş, A. F. İş gören verimliliğinin düşmesini yol açan iş zaman kayıpları ve bir iş ölçümü uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul. (1998).
- [16] Cooper, R. G. Stage-gate systems: A new tool for managing new products. *Business Horizons*. 1990; 33(3): 44-54.
- [17] Hart, S. Dimensions of success in new product development: An exploratory investigation. *Journal of Marketing Management*. 1993; 9: 23-41.
- [18] Tzokas, N., Hultink, E.J., Hart, S. Navigating the new product development process. *Industrial Marketing Management*. 2004; 33: 619-626.

A Wide Frequency Range C-V and G-V Characteristics Study in Schottky Contacts with a BODIPY-Pyridine Organic Interface

Enis TAŞCI* 

¹Giresun University, Vocational School of Health Services, Giresun, Turkey

Article Info

Research article
Received: 02/02/2023
Revision: 27/04/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

Capacitance
Conductance
Organic material
Schottky diode

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/02/2023
Düzeltilme: 27/04/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Kapasitans
İletkenlik
Organik malzeme
Schottky diyot

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, we studied capacitance/conductance-voltage (C-V and G-V) characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode. Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In was produced by spin coating method. Capacitance and conductance measurements of the diode at room temperature are made in dark over the frequency range of 10 kHz to 1 MHz.

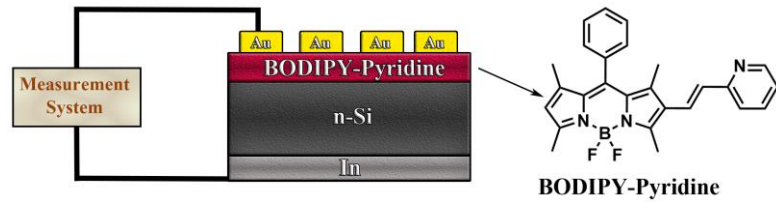


Figure A: Measurement system of Schottky diode / Şekil A: Schottky diyotun ölçüm sistemi

Highlights (Önemli noktalar)

- Synthesis of BODIPY Pyridine
- Production of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode
- XXX Capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) measurements
- Determination of the series resistance (R_s) and the interface state density (N_{ss}) values

Aim (Amaç): In this study, it was aimed to produce an organic interface layered Schottky diode structure and frequency effect on capacitance-conductance-voltage measurements. / Bu çalışmada, organik arayüzey katmanlı Schottky diyot yapısının üretilmesi ve kapasitans-iletkenlik-gerilim ölçümlerine frekans etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): In this study, fluorescence active BODIPY based organic material was synthesized and used as an interlayer for MS structures. The forward and reverse bias C-V and G-V characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode have been investigated at different frequencies and applied bias voltage (± 4 V) ranges at room temperature. / Bu çalışmada, floresan aktif BODIPY bazlı organik malzeme sentezlenmiş ve MS yapıları için bir ara katman olarak kullanılmıştır. Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diyotun ileri ve geri öngerilim C-V ve G-V karakteristikleri oda sıcaklığında farklı frekanslarda ve uygulanan öngerilim voltajı (± 4 V) aralıklarında incelenmiştir.

Results (Bulgular): Capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) measurements of Schottky diode was taken in the dark at room temperature in the frequency range of 10 kHz-1 MHz. As a result of the measurements obtained; Interfacial state density (N_{ss}) and series resistance (R_s) parameters were calculated at different frequencies.

Conclusion (Sonuç): The series resistance values of the conductance peak as measured by the Nicollian and Brews technique were 3.03 k Ω and 0.27 k Ω in the dark for frequencies of 10 kHz and 1 MHz, respectively. The interface state density values for frequencies of 100 kHz and 1 MHz were calculated using the Hill and Coleman technique to be 1.21 $\times 10^{12}$ eV⁻¹ cm⁻² and 1.05 $\times 10^{11}$ eV⁻¹ cm⁻² in the dark, respectively. / Nicollian ve Brews tekniği ile ölçülen iletkenlik pikinin seri direnç değerleri, 10 kHz ve 1 MHz frekansları için karanlıkta sırasıyla 3,03 k Ω ve 0,27 k Ω olarak bulundu. Hill ve Coleman tekniği kullanılarak 100 kHz ve 1 MHz frekansları için arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlıkta sırasıyla 1,21 $\times 10^{12}$ eV⁻¹ cm⁻² ve 1,05 $\times 10^{11}$ eV⁻¹ cm⁻² olarak hesaplandı.



A Wide Frequency Range C-V and G-V Characteristics Study in Schottky Contacts with a BODIPY-Pyridine Organic Interface

Enis TAŞCI*

¹Giresun University, Vocational School of Health Services, Giresun, Turkey

Article Info

Research article
Received: 02/02/2023
Revision: 27/04/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

Capcitance
Conductance
Organic material
Schottky diode

Abstract

In this study, it was aimed to produce an organic interface layered Schottky diode structure and frequency effect on capacitance-conductance-voltage measurements. In this context, phosphor doped n-type Si single crystal has been used as a semiconductor substrate with a 1-20 Ω.cm resistivity, (100) surface orientation, 2 inches in diameter and 350 μm thickness. The (E)-5,5-difluoro-1,3,7,9-tetramethyl-10-phenyl-2-(2-(pyridin-2-yl)viny)-5H-5λ4,6λ4-dipyrrolo [1,2-c:2',1'-f] [1,3,2] diazaborinine (BODIPY-Pyridine) thin film was coated on n-Si using the spin coating technique. Ohmic and rectifier contacts were coated by evaporation of indium (In) and gold (Au) using a thermal evaporation system and Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode was fabricated. Capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) measurements of this structure were gained at different frequencies in the dark. Contingent on the frequency, the series resistance (R_s) and the interface state density (N_{ss}) values were identified by using the conductance and Hill-Coleman method, respectively. The series resistance values decreased from 3.03 kΩ to 0.27 kΩ for the frequency range of 10 kHz and 1 MHz and for 4 V, respectively. The density of the interface state was determined in the range of 10^{11} eV⁻¹ cm⁻².

BODIPY-Piridin Organik Arayüzlü Schottky Kontaklarda Geniş Frekans Aralığı C-V ve G-V Özelliklerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/02/2023
Düzeltilme: 27/04/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Kapasitans
İletkenlik
Organik malzeme
Kama Yuvası
Schottky diyot

Öz

Bu çalışmada organik arayüzey tabakalı Schottky diyot yapısı üretimi ve kapasite-iletkenlik-voltaj ölçümlerine frekans etkisi amaçlandı. Bu kapsamda, 350 μm kalınlığında, (100) yönelimli, 2 inç çapında, 1-20 Ω.cm öz dirençli, fosfor katkılı n tipi bir silisyum yarıiletken kristali kullanıldı. Bu kristalin üzerine “(E)-5,5-difloro-1,3,7,9-tetrametil-10-fenil-2-(2-(piridin-2-yl)viny)-5H-5λ⁴,6λ⁴-dipirol [1,2-c:2',1'-f][1,3,2] diazaborinin” (BODIPY-Pyridine) ince filmi spin kaplama tekniği kullanılarak kaplandı. Termal buharlaştırma sistemi kullanılarak indiyum (In) ve altın (Au) buharlaştırılmasıyla omik ve doğrultucu kontaklar kaplandı ve Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diyotu üretildi. Bu yapının karanlıkta farklı frekanslarda kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri alındı. Frekansa bağlı olarak seri direnç (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri sırasıyla iletkenlik ve Hill-Coleman yöntemi kullanılarak belirlendi. Seri direnç değerleri 10 kHz ve 1 MHz ve 4 V için sırasıyla 3,03 kΩ'dan 0,27 kΩ'a azaldı. Arayüz durumunun yoğunluğu 10^{11} eV⁻¹ cm⁻² aralığında belirlendi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Due to their technological advantages in optoelectronic applications, the electrical properties of metal-semiconductor (MS) and metal-interface layer-semiconductor (MIS) type Schottky barrier diodes (SBDs) have been extensively investigated for a long time [1-3]. The nonideal behavior observed in electrical features of SBDs has been generally attributed to the effect of interface layer properties [4, 5]. The performance of these diodes is

particularly influenced by the interfacial layer development at the MS interface, the level of interface states (N_{ss}) at the organic layer/Si interface, and the series resistance (R_s) of the devices. Therefore, it is crucial to identify the interface characteristics of a Schottky diode with an organic base [6]. Also, the frequency dependent C-V and G-V measurements in the wide range of frequency can give us valuable information about the energy distribution of the interface states and of these structures [7]. On the other hand, the series

resistance R_s of the semiconductor bulk also plays an important role in capacitance–voltage (C-V) and conductance–voltage (G-V) characteristics of SBDs, and it causes that the interface state density N_{ss} obtained from admittance spectroscopy become different from those that would be expected [8].

The use of organic dyes as semiconducting materials in molecular optoelectronic devices has recently gained interest. The key benefits of organic dyes include their easy processing, tunable electrical properties, compatibility with flexible substrates, great optical and thermal stability, low cost, and ease of manufacture for large-area applications. Many optoelectronic devices, including Schottky diodes, photodiodes, organic light-emitting diodes, and solar cells, have been made using organic dyes as semiconductors [9-15].

Due to their unique and desirable properties, such as good photochemical and thermal stability, strong absorption, high fluorescence quantum yield, and good solubility, BODIPY (4,4-difluoro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indacene)-based dyes have attracted a lot of attention in recent decades in remarkably diverse applications [13, 16-18]. These factors make the BODIPY a fascinating fluorescent structure that may be used in a variety of devices, including photovoltaics, dye-sensitized solar cells, fluorescent molecular probes, and light-harvesting arrays. Due to its spectroscopic characteristics, the BODIPY has a noteworthy structure in the creation of molecular optoelectronic materials. In order to demonstrate the full potential of π -extended BODIPY compounds in various optoelectronic applications, electrical and optical characterizations of these compounds are also highly required [17, 18].

In this study, BODIPY based dye was synthesized and used as an interlayer for MS structures. The forward and reverse bias C–V and G–V characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode have been investigated at different frequencies and applied bias voltage (± 4 V) ranges at room temperature. The effects of the insulating layer, series resistance (R_s), and interface state density (N_{ss}) on the conductivity-voltage (G-V) and capacity-voltage (C-V) measurements of Schottky diode structures with metal/Organic material/semiconductor (MOMs) structure have recently been the subject of studies. In order to assess the electrical characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode, characteristic measurements of conductivity-voltage (G-V) and capacitance-voltage (C-V) were carried across a wide frequency range (10 kHz–1000 kHz). In order to reduce the

impact of the existence of interface states, measurements are also performed at high frequencies. Basic parameters like series resistance (R_s) and interface state density (N_{ss}) were explored dependent on the voltage and frequency as a result of the graphs constructed utilizing the measurements and calculations.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIALS AND METHOD)

BODIPY-Pyridine was prepared according to published literature procedures [19] and obtained as a green solid (58% yield). The molecular structure of BODIPY-Pyridine was confirmed by ^1H , and ^{13}C NMR spectroscopy [19]. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.57 (d, 1H), 7.64 (dt, 1H), 7.52–7.50 (m, 3H), 7.47 (s, 1H), 7.34–7.29 (m, 2H), 7.28 (s, 1H), 7.13–7.09 (m, 1H), 6.73 (1H), 6.02 (s, 1H), 2.77 (s, 3H), 2.59 (s, 3H), 1.52 (s, 3H) and 1.39 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 156.4, 155.9, 155.0, 149.6, 143.9, 141.8, 139.4, 136.5, 135.1, 132.0, 131.2, 129.5, 129.3, 129.1, 128.2, 127.9, 123.9, 121.9, 121.8, 14.8, 14.5, 14.2 and 13.0.

The Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In device was produced utilizing a n-type Si (100) wafer with a thickness of 500 μm and a resistance of 20 $\Omega\text{-cm}$. The n-Si wafer was cleaned in an ultrasonic bath using acetone, methanol, and deionized water. Then, using an HF:H₂O (1:10) solution, the contaminants and the natural oxide layer on the surfaces were eliminated. After thermally evaporating indium metal to create an ohmic contact on the back of the n-Si wafer, the wafer was annealed at 350 °C for 30 seconds in an inert gas. Then, 10 mg of the synthesized BODIPY-Pyridine was dissolved in chloroform (1 ml). At ambient temperature, the solution was mixed for an hour. Spin coating was used to form BODIPY-Pyridine thin films at 1200 rpm for 30 seconds. Finally, a metallic front Au contact was created by thermal evaporation on the BODIPY-Pyridine thin film. A quarter of a 2-inch Si crystal was used for the produced Schottky structure. Schottky contact diameter is 2 mm. Purity of both In and Au metal contacts are 99.99%. Thickness of both In and Au metal contacts are 200 nm. Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In (MOMs) device is shown in Figure 1.

A HP 4192A impedance analyzer was used to acquire admittance data from the manufactured device structure. These measurements were examined at room temperature over a wide frequency range (10 kHz–1 MHz).

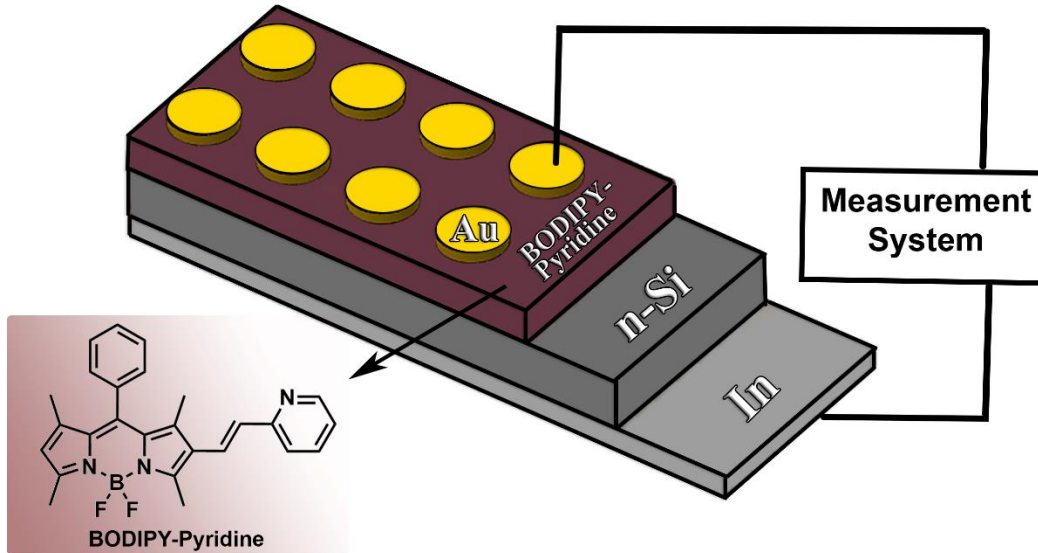


Figure 1. Schematic diagram of the Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In device

3. RESULTS (BULGULAR)

Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode was prepared by thermal evaporation and spin coating method. Capacitance-voltage (C_m -V) and conductance-voltage (G_m -V) measurements of Schottky diode was taken in the dark at room temperature in the frequency range of 10 kHz-1 MHz. As a result of the measurements obtained; Interfacial state density (N_{ss}) and series resistance (R_s) parameters were calculated at different frequencies.

Figure 2 and Figure 3 show the C_m -V and G_m -V characteristics measurements of the Au/BODIPY-

Pyridine/n-Si/In Schottky diode as function of the applied voltage in the frequency range of 10 kHz–1 MHz at room temperature. The applied voltage range was taken between -4 and $+4$ V. As shown in Fig. 2, for all frequencies, C_m -V graphs exhibit the inversion-depletion-accumulation zones typical of metal-insulator-semiconductor (MIS) type Schottky diodes. Both frequency and bias voltage affect the C_m values. C_m changes most in the inversion and depletion zones, whereas it virtually never changes in the accumulation region. Due to the interface state charge's inability to contribute the ac signal at higher frequencies, as illustrated in Fig. 2, the value of capacitance decreases with frequency at all voltages [20-23].

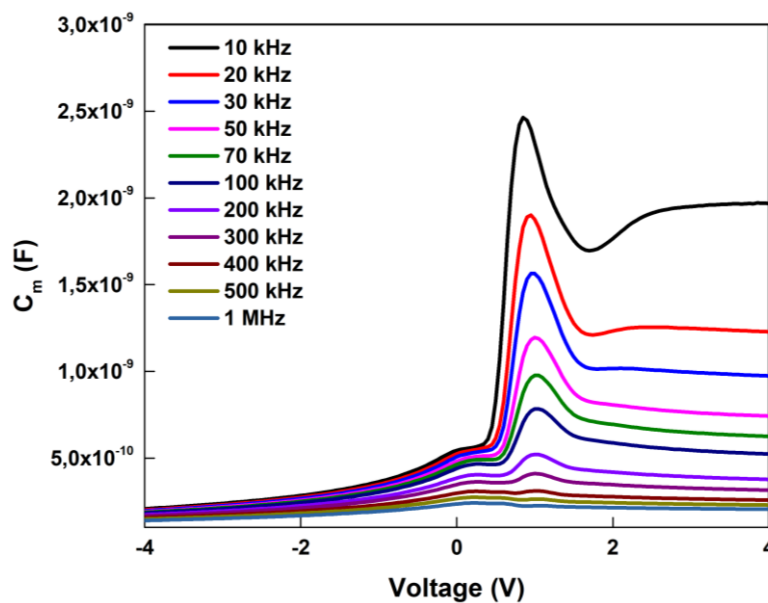


Figure 2. The Experimental capacitance-voltage (C_m -V) characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In at different frequencies

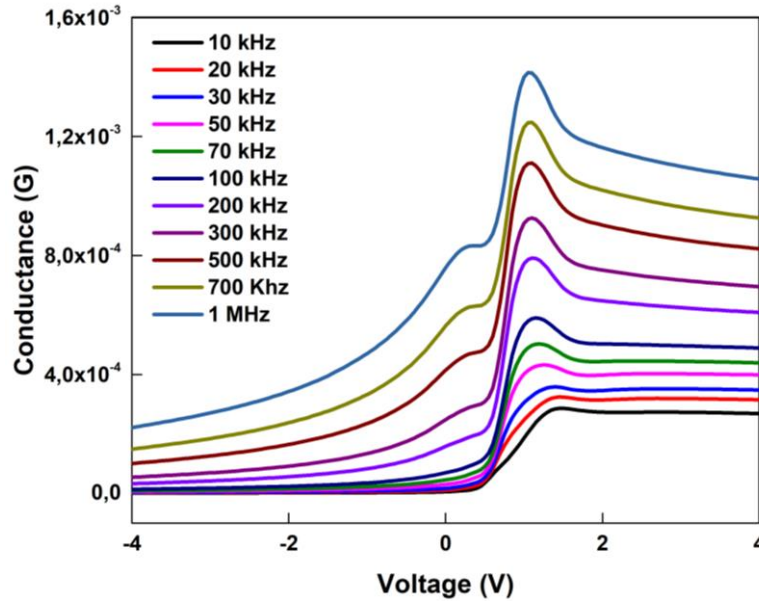


Figure 3. The Experimental conductance-voltage (G_m -V) characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In at different frequencies

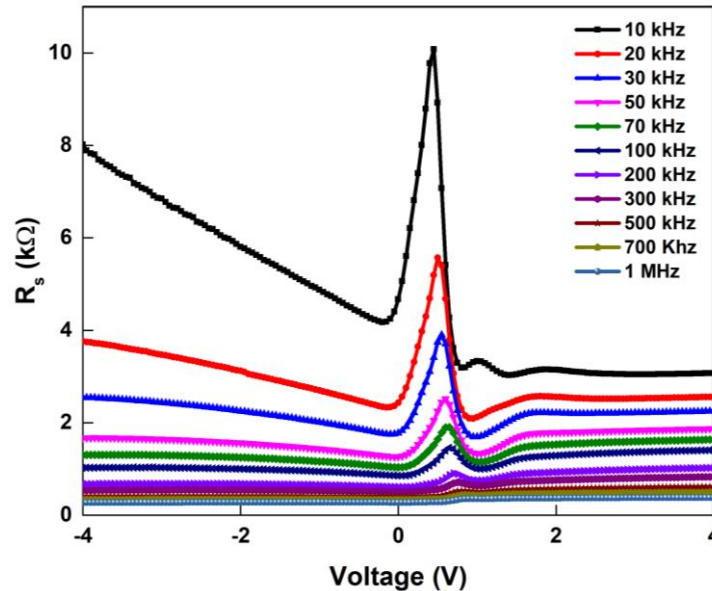


Figure 4. The experimental R_s -V characteristics of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode

When the measurements of the diode are analyzed, it can be seen that the capacitance values for the depletion, inversion, and accumulation zones drop with increasing frequency while the capacitance value increases with rising voltage. The reason why the capacitance values decrease as the frequency decreases is due to the fact that the carriers contributing to the capacitance cannot follow the high frequency signal. As can be observed in Fig. 3, the conductance values for the depletion, inversion, and accumulation zones rise with rising frequency and voltage. The C_m and G_m values of diode are affected by interface states density and series resistance parameters [24, 25]. Additionally, it is well known that the conductance peak position of the Schottky diodes changes with R_s and N_{ss} .

Series resistance (R_s) is a crucial parameter at accumulation region and forward voltage for the produced samples. Therefore, when the generated diode is examined in the accumulation zone at all frequency values, the corrected values of series resistance published by Nicollian and Brews [26] are calculated from the measured capacitance and conductance value.

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \tag{1}$$

where, G_m ; C_m and ω are the measured conductance, capacitance, and angular frequency, respectively.

Figure 4 depicts the series resistance–voltage R_s -V graphs of the Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode at different voltages. As shown in Fig. 4, the series resistance value has a peak position for each frequency, and as the frequency value increased, the magnitude of the maxima R_s value dropped. The R_s values (for 4V) were found as 3.03 k Ω and 0.27 k Ω for 10 kHz and 1 MHz, respectively.

The C_m and G_m measurements were corrected to reduce the impact of R_s in the accumulation and depletion zone. In line with this, corrected capacitance, C_c , and corrected conductance, G_c , are expressed by the following equations [21, 27]

$$C_c = \frac{G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)C_m}{a^2 + (\omega^2 C_m^2)} \tag{2}$$

$$G_c = \frac{G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)a}{a^2 + (\omega^2 C_m^2)} \tag{3}$$

Where a is a constant and is given as follows,

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)]R_s \tag{4}$$

Figs. 5 and 6 show the corrected experimental forward and reverse bias C -V and G -V characteristics for the Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode at different frequencies.

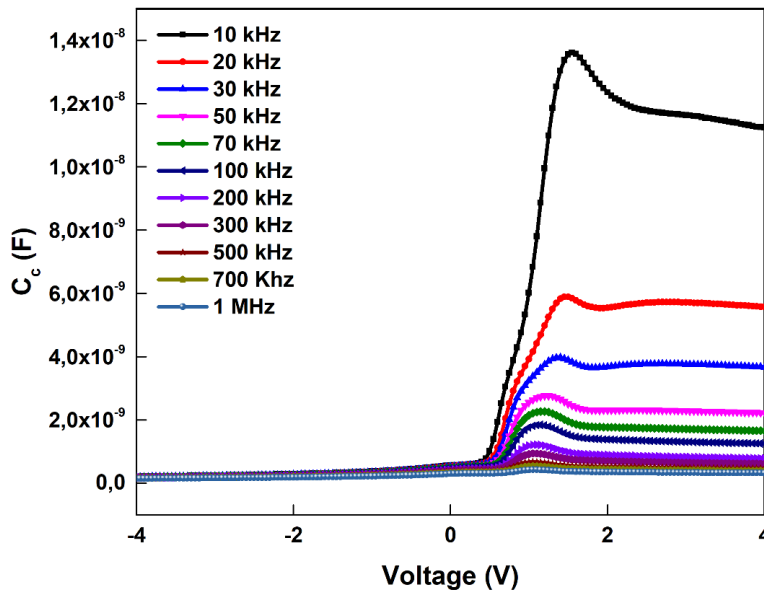


Figure 5. Corrected capacitance–voltage (C_c -V) plots of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode at different voltages

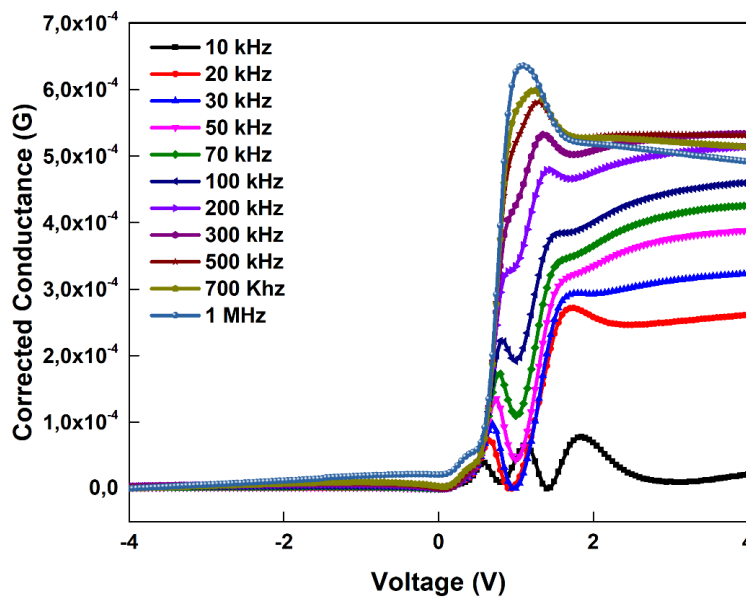


Figure 6. Corrected conductance –voltage (G_c -V) plots of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode at different voltages

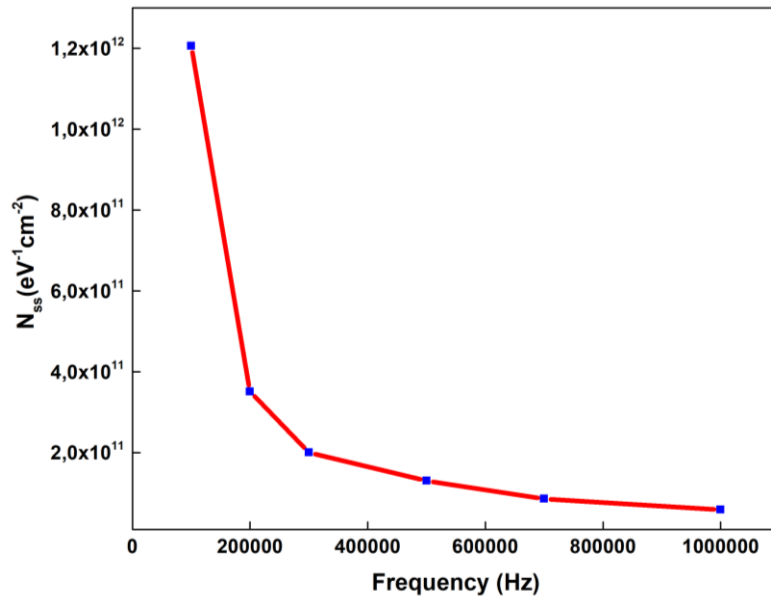


Figure 7. Variation of interface state density (N_{ss}) with frequency

As mentioned above, the series resistance effect on the device characteristics is clearly apparent when the corrected $C-V$ and $G-V$ characteristics are compared to the uncorrected ones at each frequency. When Figure 5 is considered, it has been determined that there is an increase in the capacitance values after the series resistance correction and the real capacitance values remain constant depending on the increasing voltage in the accumulation region. In Figure 6, it has been found that a smooth peak is observed at every frequency in the depletion region and the corrected conductivity values, especially from the depletion region to the accumulation region, decrease depending on the increasing voltage. The peaks that occur in the depletion region in the conductance curves are due to the concentration of the interface states in the forbidden energy range in a special region [26, 28]. This situation in the C_c-V and G_c-V graphs shows that the effect of R_s values is significant and that the effect of these R_s values should be subtracted from the measured C_m-V and G_m-V graphs. If the R_s effect is not removed from the relevant measurements, the accuracy and reliability of the obtained parameters will be reduced.

There are different methods for calculating the interfacial state density in MIS type Schottky diodes [29]. The distribution profile of the interface states for the produced sample was determined using the Hill-Coleman method at different frequencies [30]. If the corrected conductivity values of the Schottky diode produced according to this method go to a maximum in the consumption region, these maximum values are proof that there are interfacial states occurring at the organic/inorganic interface.

After subtracting the series resistance effect from the conductivity values measured for Au/ BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode, peaks were observed at all frequencies in the depletion region in the corrected conductivity values. According to the Hill-Coleman method, the N_{ss} values of the MIS/MOmS structure can be determined from the following equation [30],

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_{c,max}/\omega)}{(G_{c,max}/\omega C_{ox})^2 + (1 - C_c/C_{ox})^2} \quad (5)$$

Where $G_{c,max}$ is the value of peak of the G_c-V plots, C_c is the capacitance of the diode related to $G_{c,max}$, A is the diode area, q is the elementary electrical charge, $\omega(=2\pi f)$ is the angular frequency and C_{ox} is the capacity of the organic layer, which is obtained from the values in the accumulation region of the corrected capacitance and conductivity measurements at 1 MHz.

Fig. 7 demonstrates the variation of N_{ss} with different frequency. It is clearly seen that the N_{ss} value is decreased with an increase in frequency. N_{ss} values were calculated as $1.21 \times 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ and $1.05 \times 10^{11} eV^{-1} cm^{-2}$ at 100 kHz and 1 MHz frequencies, respectively. This decrease results from the behavior of interface charge carriers [29]. Çavdar et. al. [31] produced the Al/Gelatin/n-Si Schottky structure and reported the values of series resistance and interface state density were determined as 810 Ω and $1.52 \times 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ for 30 kHz and 38 Ω and $3.38 \times 10^{11} eV^{-1} cm^{-2}$ for 1 MHz. Zeyrek et. al. [32] produced the Al/Perylene/p-Si Schottky structure and reported the values of series resistance and interface state

density were determined as 438Ω and $3.40 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ for 30 kHz and 148Ω and $1.47 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ for 1 MHz.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, we investigated capacitance/conductance-voltage (C-V and G-V) properties of Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In diode. Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In was produced by spin coating and thermal vaporization method. Capacitance and conductance measurements of the Au/BODIPY-Pyridine/n-Si/In Schottky diode at room temperature are made in dark over the frequency range of 10 kHz to 1 MHz. Both voltage and frequency have an impact on the values of conductance and capacitance. A MIS-type diode behavior was evident in the diode's capacitance characteristics, which included inversion, depletion, and accumulation zones. For frequencies of 10 kHz and 1 MHz, the series resistance values of the conductance peak determined by the Nicollian and Brews approach were $3.03 \text{ k}\Omega$ and $0.27 \text{ k}\Omega$ in dark. The interfacial state density was shown by the peaks in the depletion zones of the corrected conductance curves. For frequencies of 100 kHz and 1 MHz, $1.21 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ and $1.05 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in the dark were computed as the interface state density values using the Hill and Coleman method. According to measurements, the density of the interface state is within the range of $10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, which is suitable for electronic device technology. When the manufactured diode is compared to the existing research, The created diode can also be used in electronic applications, according to the testing results.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Giresun University Scientific Research Project. (Project Number: FEN-BAP-A-250620-62)

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 kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Enis TAŞCI: 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] Rhoderick E.H. and Williams R.H. Metal-Semiconductor Contacts. 1988, Oxford Clarendon Press
- [2] Sze S.M. and Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. 2007, Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.
- [3] Akgül F.D., Eymur S., Akın Ü., et al. Investigation of Schottky emission and space charge limited current (SCLC) in Au/SnO₂/n-Si Schottky diode with gamma-ray irradiation. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021. 32(12): 15857-15863.
- [4] Ho P.S., Yang E.S., Evans H.L., and Wu X. Electronic states at silicide-silicon interfaces. Physical Review Letters, 1986. 56(2): 177-180.
- [5] Sze S.M. Physics of semiconductor devices /2nd edition. 1981, New York: Wiley-Interscience.
- [6] Tuğluoğlu N., Yakuphanoglu F., and Karadeniz S. Determination of the interface state density of the In/p-Si Schottky diode by conductance and capacitance–frequency characteristics. Physica B: Condensed Matter, 2007. 393(1): 56-60.
- [7] Tuğluoğlu N., Çalışkan F., and Yüksel Ö.F. Analysis of inhomogeneous barrier and capacitance parameters for Al/rubrene/n-GaAs (100) Schottky diodes. Synthetic Metals, 2015. 199: 270-275.
- [8] Nikravan A., Badali Y., Altındal Ş., Uslu İ., and Orak İ. On the Frequency and Voltage-Dependent Profiles of the Surface States and Series Resistance of Au/ZnO/n-Si Structures in a Wide Range of Frequency and Voltage. Journal of Electronic Materials, 2017. 46(10): 5728-5736.

- [9] Özerden E., Özden P., Afşin Kariper İ., and Pakma O. The electrical characterization of metal–insulator–semiconductor device with β -naphthol orange interface. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022. 33(26): 20900-20910.
- [10] Kacus H., Sahin Y., Aydogan S., et al. Phenol red based hybrid photodiode for optical detector applications. *Solid-State Electronics*, 2020. 171: 107864.
- [11] Zeyrek S., Acaroğlu E., Altındal Ş., Birdoğan S., and Bülbül M.M. The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C–V and G/w–V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes. *Current Applied Physics*, 2013. 13(7): 1225-1230.
- [12] Benhaliliba M. and Ben Ahmed A. The phthalocyanine blue-green pigments devices intended for optical filters. *Optik*, 2022. 258: 168808.
- [13] Özcan E., Keşan G., Topaloğlu B., et al. Synthesis, photophysical, DFT and photodiode properties of subphthalocyanine–BODIPY dyads. *New Journal of Chemistry*, 2018. 42(7): 4972-4980.
- [14] Ganesh V., Manthrammel M.A., Shkir M., et al. Organic semiconductor photodiode based on indigo carmine/n-Si for optoelectronic applications. *Applied Physics A*, 2018. 124(6): 424.
- [15] Salem G.F., El-Shazly E.A.A., Farag A.A.M., and Yahia I.S. Optical and microelectronic analysis of rhodamine B-based organic Schottky diode: a new trend application. *Applied Physics A*, 2018. 124(11): 744.
- [16] Yuan L., Su Y., Cong H., Yu B., and Shen Y. Application of multifunctional small molecule fluorescent probe BODIPY in life science. *Dyes and Pigments*, 2022. 208: 110851.
- [17] Özcan E., Topaloğlu Aksoy B., Tanrıverdi Eçik E., et al. Fabrication of hybrid photodiode systems: BODIPY decorated cyclotriphosphazene covalently grafted graphene oxides. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2020. 7(16): 2920-2931.
- [18] Topaloğlu Aksoy B., Keşan G., Özcan E., et al. Solution-processable BODIPY decorated triazine photodiodes and their comprehensive photophysical evaluation. *New Journal of Chemistry*, 2020. 44(5): 2155-2165.
- [19] Üçüncü M., Karakuş E., and Emrullahoğlu M. A BODIPY/pyridine conjugate for reversible fluorescence detection of gold(III) ions. *New Journal of Chemistry*, 2015. 39(11): 8337-8341.
- [20] Duman S., Gürbulak B., Doğan S., and Türüt A. Capacitance and conductance–frequency characteristics of Au–Sb/p-GaSe:Gd Schottky barrier diode. *Vacuum*, 2011. 85(8): 798-801.
- [21] Cavdar S., Demirozmez Y., Turan N., Koralay H., and Tuğluoğlu N. Analysis of voltage and frequency-dependent series resistance and interface states of Al/ZnCo₂O₄: Gelatin/n-Si diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022. 33(29): 22932-22940.
- [22] Demirezen S., Orak İ., Azizian-Kalandaragh Y., and Altındal Ş. Series resistance and interface states effects on the C–V and G/w–V characteristics in Au/(Co₃O₄-doped PVA)/n-Si structures at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017. 28(17): 12967-12976.
- [23] Kılçık A., Berk N., Seymen H., and Karataş Ş. Study on preparation of graphene oxide thin film layers: the electrical and dielectric characteristics of Au/GO/n-type Si junction structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021. 32(6): 7913-7925.
- [24] Çam Ş.U., Yazıcı A.N., Alsaç A.A., and Serin T. Investigation of the effect of Sn doping on Al/Sn: ZnS/p-Si diode parameters with C–V and G/ ω -V characteristics. *Physica B: Condensed Matter*, 2022. 627: 413593.
- [25] Ulusoy M., Badali Y., Pirgholi-Givi G., Azizian-Kalandaragh Y., and Altındal Ş. The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Schottky structures with ruthenium dioxide-doped organic polymer interface. *Synthetic Metals*, 2023. 292: 117243.

- [26] Nicollian E.H. and Brews J.R. MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology. 1982: Wiley New York.
- [27] Turut A., Karabulut A., Ejderha K., and Bıyıklı N. Capacitance–conductance–current–voltage characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015. 39: 400-407.
- [28] Tozlu C. and Mutlu A. Poly(melamine-co-formaldehyde) methylated effect on the interface states of metal/polymer/p-Si Schottky barrier diode. *Synthetic Metals*, 2016. 211: 99-106.
- [29] Tuğluoğlu N., Yüksel Ö.F., Karadeniz S., and Şafak H. Frequency dependent interface state properties of a Schottky device based on perylene-monoimide deposited on n-type silicon by spin coating technique. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2013. 16(3): 786-791.
- [30] Hill W.A. and Coleman C.C. A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electronics*, 1980. 23(9): 987-993.
- [31] Cavdar S., Demiroolmez Y., Turan N., Koralay H., Tuğluoğlu N., and Arda L. Investigation of trap states, series resistance and diode parameters in Al/gelatin/n-Si Schottky diode by voltage and frequency dependent capacitance and conductance analysis, *ECS Journal of Solid State Science Technology*, 2022. 11: 025001.
- [32] Zeyrek S., Acaroğlu E., Altındal Ş., Birdoğan S., Bülbül M.M. The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C–V and G/w–V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes, *Current Applied Physics*, 2013. 13(7): 1225-1230.

Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi

Aslıhan BAYYIĞIT¹ , Oğuz Kaan ÇİNİCİ^{2*} , Adem ACIR² 

¹EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 06510 ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500 ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/05/2023
Düzeltilme: 26/05/2023
Kabul: 26/05/2023

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik (FV)
Tek Yüzeyle FV
Çift Yüzeyle FV
PVsyst
Albedo

Article Info

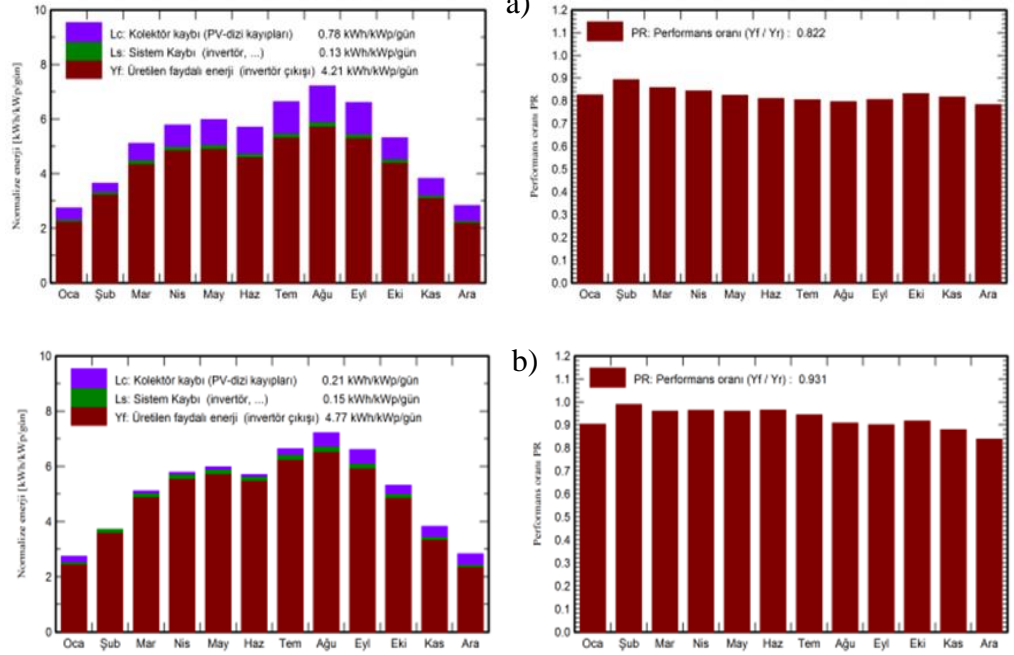
Research article
Received: 17/05/2023
Revision: 26/05/2023
Accepted: 26/05/2023

Keywords

Photovoltaic (PV)
Monofacial PV
Bifacial PV
PVsyst
Albedo

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada PVsyst yazılımı kullanılarak tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV panellerin performansı karşılaştırılmıştır. / In this study, the performance of monofacial and bifacial PV panels was compared using PVsyst software.



Şekil A: a) Tek yüzeyle FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı b) Çift yüzeyle FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı eğrisi **Figure A:** a) Monthly energy production and performance rate of monofacial PV panel b) Monthly energy production and performance rate curve of bifacial PV panel

Önemli noktalar (Highlights)

- Tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV'lerin kıyaslanması / Comparison of monofacial and bifacial PVs
- PVsyst yazılımı kullanımı / Use of PVsyst software

Amaç (Aim): Çalışma, tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV sistemlerini karşılaştırarak hangi FV sistemi kullanmanın daha avantajlı olduğunu saptamayı amaçlamaktadır. / The study aims to determine which PV system is more advantageous by comparing monofacial and bifacial PV systems.

Özgünlük (Originality): Kurulum için seçilen yer, marka kullanımları ve yapılan analizler çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. / The location chosen for the installation, the use of brands and the analyses made constitute the original aspect of the study.

Bulgular (Results): Tek yüzeyle panellerin ortalama %82,21 performans oranıyla 1537 kWh/yıl ve çift yüzeyle panellerin ortalama %93,06 performans oranıyla 1740 kWh/yıl üretim potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. / It has been observed that monofacial panels have a production potential of 1537 kWh/year with an average performance ratio of 82.21%, and a production potential of 1740 kWh/year with an average performance ratio of 93.06% for bifacial panels.

Sonuç (Conclusion): Çift yüzeyle FV sistemlerini kullanmak, tek yüzeyle FV sistemlerini kullanmaktan daha avantajlıdır. / Using bifacial PV systems is more advantageous than using monofacial PV systems.



Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi

Aslıhan BAYYIĞIT¹ , Oğuz Kaan ÇİNİCİ^{2*} , Adem ACIR²

¹EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 06510 ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500 ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/05/2023
Düzeltilme: 26/05/2023
Kabul: 26/05/2023

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik (FV)
Tek Yüzeyle FV
Çift Yüzeyle FV
PVsyst
Albedo

Öz

Günümüzde enerji talebinin artmasıyla birlikte, fotovoltaik panellerin performansının artırılması önem kazanmaktadır. Bu nedenle, tek yüzeyle ve çift yüzeyle fotovoltaik panellerin (FV) performanslarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, PVsyst yazılımı kullanılarak tek yüzeyle ve çift yüzeyle panellerin performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma, hesaplamaların hem tek taraflı hem de çift taraflı paneller için aynı koşullar altında yapılmasını sağlamak için Ankara ilinde aynı model tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV paneller ile iki farklı güneş enerji santrali tasarlanmıştır. Bu iki tasarımın verimlilikleri kıyaslanmış, albedo etkisi incelenmiş, CO₂ emisyon analizi ve teknik analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, tek yüzeyle panellerin ortalama %82,21 performans oranıyla 1537 kWh/yıl ve çift yüzeyle panellerin ortalama %93,06 performans oranıyla 1740 kWh/yıl üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Çift yüzeyle panellerin tek yüzeyle panellere göre daha yüksek performans gösterdiği ve yıllık ortalama enerji üretiminin %13 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çift yüzeyle güneş paneli sistemlerinin verimliliği ve çevresel faydaları nedeniyle tek yüzeyle sistemlere göre daha yaygın hale getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabilir.

Performance Analysis of Monofacial and Bifacial Photovoltaic Panels

Article Info

Research article
Received: 17/05/2023
Revision: 26/05/2023
Accepted: 26/05/2023

Keywords

Photovoltaic (PV)
Monofacial PV
Bifacial PV
PVsyst
Albedo

Abstract

With the increase in energy demand, it is important to increase the performance of photovoltaic panels. Therefore, comparing and evaluating the performances of monofacial and bifacial photovoltaic panels (PV) is an important research topic. In this study, the performances of monofacial and bifacial PV panels were compared using the PVsyst software. In the study, two different solar power plants were designed with the same model of monofacial and bifacial PV panels in Ankara to ensure that the calculations were made under the same conditions for both monofacial and bifacial PV panels. The efficiencies of these two designs were compared, the albedo effect was examined, and CO₂ emission analysis and technical analysis were made. The results of the study show that monofacial panels have a production potential of 1537 kWh/year with an average performance rate of 82.21%, and bifacial panels have a production potential of 1740 kWh/year with an average performance of 93.06%. It has been determined that bifacial panels perform higher than monofacial panels and the annual average energy production is 13% higher. These results, making bifacial solar panel systems more common than monofacial systems due to their efficiency and environmental benefits could be an important step for sustainable energy production.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfus ve sanayileşme ile enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu talebi karşılamak için kullanılan fosil yakıtlar iklim krizine sebep olmuştur. Yaşanan olumsuzlukların etkilerini en aza indirmek için 2019 yılında yeşil mutabakat gündeme gelmiştir [1]. 2020 yılında Avrupa Komisyonu tarafından imzalanan bu mutabakat

2050 yılına kadar net sıfır emisyonu geçmek için birtakım hedefler içermektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliğine yönelik eylemler bu hedefler kapsamında önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi en hızlı gelişen yenilenebilir kaynaktır [2]. Güneş enerjisi, sonsuz ve yaygın bir kaynak olması, doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi gibi avantajlarından dolayı hızla yaygınlaşmaktadır [3].

Ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş panelleri giderek yaygın hale gelmiştir. Ülkemizin bol güneşi ve artan enerji ihtiyacıyla birlikte, daha fazla kişi ve işletme, maliyet etkili ve sürdürülebilir bir çözüm olarak güneş enerjisine yönelmektedir. Türkiye’de güneş enerjisine dayalı kurulu güç 9.425,4 MW’tır. Diğer kurulu güç kaynakları içerisinde güneşin enerjisinin payı % 9,08 dir [4].

Kurulacak sistemin tasarımının doğruluğunu ve performansını optimize etmek için kurulum öncesi simülasyon programı kullanmak önemlidir. Çünkü simülasyon programları, güneş radyasyonu, panel, inverter performansı ve enerji üretimi gibi birçok faktörü hesaba katarak GES’in tasarım ve performans özelliklerini modelleyebilir [5]. Gerçek koşullara en yakın sonuçları sağlamak için çeşitli parametreleri ve koşulları kullanır. FV sistemleri ile enerji üretimi PVsyst, PVsol, Matlab/Simulink, Helioscope, PVcase vb. gibi simülasyon yazılım programları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Literatürde bu programların incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [6]–[7]. Bu programlardan biri olan PVsyst, farklı FV panel tiplerinin modellerini içerir ve sistem bileşenleri için tasarım ve performans parametreleri sağlar.

Güneş enerjisi üretiminde kullanılan paneller, tek yüzeyli veya çift yüzeyli olarak üretilebilir. Çift yüzeyli fotovoltaik paneller, güneş ışığının hem ön yüzeyden hem de arka yüzeyden absorbe edilmesine izin verir. Bu, tek yüzeyli panellere kıyasla daha yüksek bir toplam enerji verimliliği sağlar. Bu nedenle, çift yüzeyli FV teknolojisi son yıllarda giderek daha yaygın hale gelmiştir ve ilgi artmıştır ve araştırma konusu olmuştur [8]–[9].

Çalık çalışmasında, 5 farklı bölge seçip çift yüzeyli ve tek yüzeyli FV panellerin beyaz zemin, kum zemin ve asfalt zemin koşullarında modellemesini yapmıştır. Çift yüzeyli ve tek yüzeyli panellerin performanslarını kıyaslamayı amaçlayan bu çalışmada PVsyst programını kullanmıştır. Çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında bütün bölgelerde çift yüzeyli panellerin veriminin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çift yüzeyli panelin geri ödeme süresinin tek yüzeyli panele göre 0,4 yıl daha erken olduğu belirlenmiştir [10].

Prasad, Batı Viti Levu, Fiji’de çift yüzeyli ve tek yüzeyli güneş enerjisi panellerinin karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. PVsyst simülasyon programını kullanarak oluşturduğu modellerin sonucunda çift yüzeyli güneş enerjisi santralının %93,13’lük daha iyi bir performans oranıyla yıllık 22.149 MWh enerji

üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Çift yüzeyli güneş enerji santrallerinin, tek yüzeyli güneş enerji santrallerine kıyasla daha fazla enerji üretme ve daha yüksek sera gazı önleme potansiyeline sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [11].

NSS Mohamed ve diğerleri, PVsyst simülasyon programını kullanarak tek ve çift yüzeyli panellerin tasarımını, simülasyonunu ve ekonomik analizini yapmıştır. Sonuçlar, 0,25’lik düşük albedo değeri ile çift yüzeyli FV modüllerinin arka tarafı, tek yüzeyli FV sistemine kıyasla %4,48 ek enerji üretimi yapabileceğini göstermektedir. Çift yüzeyli FV sisteminin, tek yüzeyli FV modüllerine sahip sisteme kıyasla daha düşük elektrik maliyetiyle daha yüksek enerji çıkışı üretim yapabileceğine ulaşılmıştır [12].

Türkdoğru ve Kutay tarafından yapılan çalışmada, farklı zemin modelleri ve albedo değerleri kullanarak çift yüzeyli FV sistemlerin performansı simüle edilmiştir. Sonuçlar, yüksek albedo değerlerinin çift yüzeyli FV sistemlerde daha büyük bir güç artışına neden olduğunu göstermiştir. Bu da çift yüzeyli FV sistemlerin albedo etkisine daha duyarlı olduğunu göstermiştir [13].

Bu çalışmada Ankara ilinde belirlenen koordinatlarda, çift yüzeyli ve tek yüzeyli güneş enerji santrallerinin tasarım ve analizi PVsyst simülasyon programının 7.2.4 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı koordinatlar kullanıldığı için, programın hesaplamaları her iki santral için de aynı koşullar dikkate alarak gerçekleştirir. Bu, tasarım ve analiz sonuçlarının daha doğru ve karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Ayrıca, zeminin albedo etkisi de incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerin performansı PVsyst yazılımı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tek yüzeyli paneller, sadece bir taraftan güneş ışığı alabilirken, çift yüzeyli paneller hem üst hem de alt taraflarından güneş ışığı alabilirler. Bu çalışmada, aynı boyuttaki ve aynı verimlilik sınıfına sahip iki farklı FV paneli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan İsviçre Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen PVsyst programı, fotovoltaik sistemlerin performansının daha doğru bir şekilde simüle edilmesini sağlayarak, tasarım, optimize etme ve finansal analiz gibi bir dizi farklı görevde kullanılabilir. Bu program, farklı çevresel parametreleri dikkate alınabilmesi ve detaylı hesaplamalar yapabilmesi

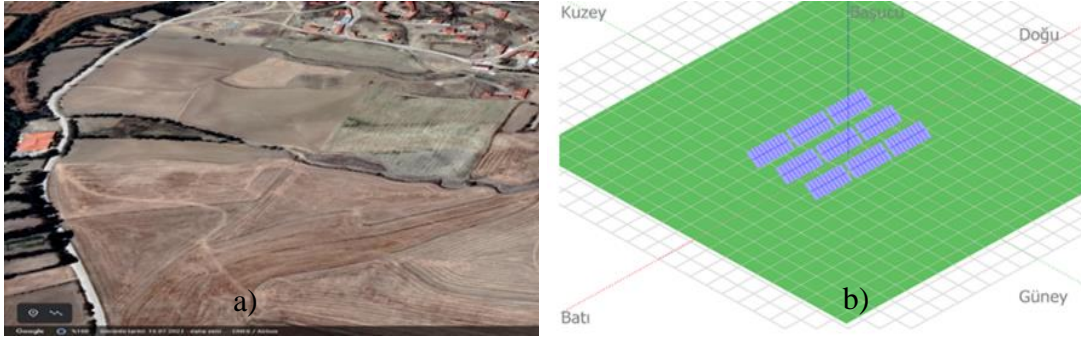
nedeniyle, benzer programlara kıyasla daha etkili bir araçtır [14].

Öncelikle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin aynı şartlarda test edilebilmesi için, her iki panel aynı güç çıkışına sahip olarak seçilmiştir. Ardından, PVsyst yazılımı kullanılarak her iki panelin performansı simüle edilmiştir.

2.1. Ankara'nın Parametreleri (Ankara's Parameters)

Ankara yüzölçümü olarak Konya ve Sivas'tan sonra, Türkiye'nin en büyük üçüncü ilidir. İlin genel yüzölçümü 24.521 km²'dir. Ankara ilinin 25 ilçesi

vardır. Ankara'nın güneyinde İç Anadolu ikliminin belirgin karasal iklimi, kuzey tarafında ise Karadeniz ikliminin ılıman ve yağışlı halleri görülür. Yıl içerisinde ortalama en düşük sıcaklık Ocak ayında -3.2 °C, ortalama en yüksek sıcaklık Ağustos ayında 30.5 °C olarak gerçekleşmiştir. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 2506 saat ve yıllık ortalama güneş ışınımı 1389 Wh/m²'dir. Güneş panellerinin kurulumu için seçilen koordinatlar 39.55°K, 32.51°D ve rakım 859 m'dir. Şekil 1.a'da Google Earth görünümü gösterilmiştir. Seçilen bölgenin çevresinde yapı ve bitki örtüsü olmadığı için gölgeleme riski bulunmamaktadır.



Şekil 1. a) Güneş panellerinin kurulumu için seçilen alanın Google Earth görünümü (Google Earth view of the area selected for the installation of solar panels) b) Tasarlanan FV sisteminin PVsyst programında görünümü (View of the designed PV system in the PVsyst program)

PVsyst programında tasarlanan güneş enerji santralının görünümü Şekil 1.b'de gösterilmektedir. Bu görünüm, PVsyst programının "Gölgelendirme sahnesi" özelliği kullanılarak görüntülenebilir. Bu özellik, güneş panellerinin gerçek zamanlı gölgeleme analizlerinin yapılabildiği ve panellerin özelliklerinin detaylı bir şekilde görüntülenebildiği bir araçtır. Bu özellik kullanılarak, güneş panellerinin 3 boyutlu bir modeli oluşturulabilir ve paneller arasındaki mesafeler, eğim açıları, dizi sayısı ve konumu gibi parametreler ayarlanabilir. Daha sonra, program, belirtilen tarih ve saatlerde güneşin ışınlarının panellere nasıl düştüğünü simüle eder ve panellerin gölgeleme risklerini belirler. Bu özellik sayesinde, güneş panellerinin tasarımı ve konumlandırılması optimize edilerek, enerji üretim potansiyelinin artırılması ve gölgeleme kaynaklı performans kayıplarının en aza indirgenmesi sağlanabilir.

PVsyst hava durumu verileri Meteonorm veri tabanından elde edilmiştir. Meteonorm, dünya genelindeki meteoroloji istasyonlarından toplanan uzun yıllar boyunca ölçülen hava durumu verilerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir veri tabanıdır. Bu veriler, güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgar hızı, nem oranı gibi hava koşullarını içerir [15]. PVsyst gibi yazılımların doğru bir şekilde güneş enerjisi sistemlerinin performansını modellenmesine yardımcı olur. Seçilen koordinatlar için bu değerler Tablo 1'de gösterilmiştir. Güneş panellerinin kurulumu için seçilen sahanın ortalama global yatay ışınlanması 1626,5 kWh/m² 'dir ve en yüksek değer Temmuz ayında, minimum değer ise Aralık ayında kaydedilmiştir. Aylık ortalama yatay dağınık ışınlama 641 kWh/m² dir ve en yüksek değer Haziran ayında, minimum değer ise Aralık ayında kaydedilmiştir. Aylık ortalama sıcaklık 11,3 °C olurken, en yüksek değer Ağustos ayında, en düşük değer ise Şubat ayında kaydedilmiştir.

Tablo 1. Kurulum için seçilen koordinatların aylık verileri (Monthly data of coordinates selected for installation)

	Global Yatay Işınlama (kWh/m ²)	Yatay Difüz Işınlama (kWh/m ²)	Sıcaklık (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Bağıl Nem (%)
Ocak	55,8	35,8	-3,1	1,44	63,9
Şubat	73,9	39,7	-3,7	1,69	79,3
Mart	128,3	54,3	6,8	2,31	63,7
Nisan	162	70,7	10,1	2,10	60,5
Mayıs	190,1	74,2	15,6	1,98	57,2
Haziran	186	82,1	19,7	2	59,4
Temmuz	217,1	72	21,9	2,46	48,2
Ağustos	212,4	59,6	24,5	2,15	42,8
Eylül	163,8	51,3	22,3	1,72	43,1
Ekim	115,5	42,5	15,7	1,59	53,2
Kasım	69,8	31,8	5,6	2,17	70,4
Aralık	51,8	27	0,7	1,42	76,5
Toplam	1626,5	641	11,3	1,9	59,9

2.2. FV Sistem Tasarımı (PV System Design)

PVsyst programında seçilen sahanın koordinatları girilmiştir. Güneş ışınımı verileri Meteororm veri tabanından elde edilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemleri için FV modülü yönlendirmesi, sabit eğik düzlem olarak seçilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin performanslarını karşılaştırmak için aynı koordinatlar kullanılmış ve düzlem eğimi 37° olarak seçilmiş, azimut açısı ise 0° olarak belirlenmiş. Bu,

anellerin optimum açıda ve pozisyonda olmasını sağlayarak, enerji verimliliğini artırmayı hedefler.

2.2.1. FV Modül Seçimi (PV Module Selection)

Karşılaştırmalı bir çalışma yapabilmek için benzer özelliklerde tek yüzeyli ve çift yüzeyli modüller seçilmiştir. Marka olarak Trina Solar tercih edilmiştir. Tablo 2’de seçilen modüllerin özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Çift yüzeyli ve tek yüzeyli panellerin özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of the properties of bifacial and monofacial panels)

	Tek yüzeyli modül	Çift yüzeyli modül
Üretici	Trina Solar	Trina Solar
Model	TSM-DE18M-(II)-500	TSM-DEG18MC-20-(II)-500 Bifacial
Nominal güç	500 Wp	500 Wp
Hücre	75x2	75x2
Uzunluk	2176 mm	2256 mm
Genişlik	1098 mm	1133 mm
Kalınlık	35 mm	30 mm
Ağırlık	26,3 kg	32,3 kg
Modül alanı	2,389 m ²	2,556 m ²
Kısa devre akımı (I _{sc})	12,28 A	13,92 A
Açık devre voltajı (V _{oc})	51,7 V	50,3 V
Maksimum güç noktası akımı (I _{mpp})	11,69 A	13,04 A
Maksimum güç noktası voltajı (V _{mpp})	42,8 V	41,8 V
Sıcaklık katsayısı	- 0,35 %/°C	- 0,34 %/°C
Diyot doyma akımı	0,023 nA	0,021 nA
Diyot kalite faktörü	0,99 /K	1,00 /K

2.2.2. İnvvertör Seçimi (Inverter Selection)

İnvvertör için güneş enerjisi sektöründe geniş bir ürün yelpazesine sahip olan Huawei Technologies marka tercih edilmiştir. İnvvertörün boyutu, panel sayısı ve panel tipi ile doğrudan ilişkilidir. Bu durumlar göz önüne alınarak 90 kW AC çıkış gücüne sahip ve çalışma gerilimi 600 ile 1450 V aralığında olan SUN2000-90KTL-H2 modeli tercih edilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli iki model için de aynı invvertör kullanılmıştır.

2.2.3. Dizi Boyutlandırma (Array Sizing)

Dizi boyutlandırma bulunan modül sayısı ve zincir sayısı, PVsyst simülasyonunda tasarımınızı belirleyen önemli parametrelerdir. Bu parametreler, birbiriyle ilişkili ve tasarımın optimum performansını elde etmek için doğru şekilde seçilmelidir. Seri modül sayısı, modüllerin seri olarak bağlandığı dizi sayısını ifade eder. PVsyst'te, modüllerin çalışma gerilimi ve invvertörün çalışma gerilimi arasındaki uyumluluğa dikkat ederek seri modül sayısı belirlenir. Seri modül sayısını artırmak, güç çıkışını artırabilir, ancak invvertör çalışma gerilimi aşılmamalıdır. Zincir sayısı, paralel olarak bağlanan dizi sayısını ifade eder. Zincir sayısı arttıkça, toplam güç çıkışı artar, ancak toplam akım da artar. Bu nedenle, invvertörün giriş akımı sınırlarına dikkat etmek önemlidir. Ayrıca, özellikle gölgeleme gibi olumsuz koşullar altında, zincir sayısının azaltılması, modüllerin performansını artırabilir. Bu bilgiler ışığında seri modül sayısı 20, zincir sayısı 9 olarak belirlenmiştir.

2.2.4. Yerleşim ve zemin parametreleri (Layout and Ground Parameters)

Dizi parametreleri, güneş panellerinin konumlandırılması ile ilgilidir ve panellerin birbirine olan mesafesi, yüksekliği, açısı gibi faktörleri içerir. Bu parametreler, panellerin arasında gölgeleme olmamasını, güneş ışınlarının eşit olarak dağılmasını ve panellerin güneş ışınlarından en fazla yararlanmasını sağlamak için optimize edilmelidir. Zemin parametreleri ise, güneş panellerinin altındaki zemine ilişkindir. Bu parametreler, zeminin rengi, yüzeyi, eğimi gibi faktörleri içerir. Zemin parametreleri, güneş ışınlarının yansımaları ve emilimi üzerinde etkili olabilir.

$$d_{row} = w_m \cdot \cos \beta_z + w_m \left(\frac{\sin \beta_m \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_m)}{\tan \alpha} \right) \quad (1)$$

Eş. (1) kullanılarak diziler arasındaki boşluklar hesaplanmıştır. Tek yüzeyli panellerin aralıkları 8,95 m, dizi toplam eni 4,39; çift yüzeyli panellerin ise aralıkları 8,88 m, dizi toplam eni 4,36 m olarak

belirlenmiştir. Her iki panelin yerden yüksekliği 1,5 olarak ayarlanmıştır. Çift yüzeyli panel için zemin albedosu 0,6 olarak belirlenmiştir. Bu değer beyaz boya veya çimento ile rahatlıkla elde edilebilir [11].

2.3. Karbon Emisyon Analizi (Carbon Emission Analysis)

IPCC (Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli) 2006 Yönergeleri, karbon azaltımını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir kaynaktır. Tier 1 hesaplama yöntemi, CO₂ emisyonlarını hesaplamak için kullanılan basit bir formüldür [16]. Eş. (2)'de gösterilen bu yöntemde, faaliyet verileri, kütle ve kalori değeri kullanılarak belirlenir. Kütle, bir sürecin veya ürünün ağırlığını ifade ederken, kalori değeri, yakıtın ne kadar enerji ürettiğini ifade eder.

$$\text{Faaliyet Verileri} = \text{Kütle (kg)} \times \text{Kalori Değeri (CV)} \quad (2)$$

Daha sonra, Eş. (3)'deki gibi emisyonlar/yıl hesaplaması, faaliyet verileri ile CO₂ emisyon faktörü (EF) çarpılarak yapılır. CO₂ emisyon faktörü, birim başına salınan CO₂ miktarını ifade eder ve yanma için varsayılan CO₂ emisyon faktörleri, bu faktörü hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir.

$$\text{Emisyonlar/yıl} = \text{Faaliyet Verileri} \times \text{EF} \quad (3)$$

2.4. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

FV sistemi yatırımı yaparken, yatırımcılar, sistemin sağlayacağı gelirlerin, maliyetlerin ve karların tahmin edildiği bir ekonomik değerlendirme yaparak, makul bir kar oranı elde etmek isterler. Bu değerlendirme, FV sisteminin yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, enerji satış fiyatı, işletme ve bakım maliyetleri ve vergi avantajları gibi faktörlerin dikkate alınmasıyla yapılır. Bu hesaplamalar, yatırımın geri ödeme süresi, yatırım getirisi, net bugünkü değer ve iç verim oranı gibi finansal göstergelerin hesaplanmasına olanak tanır. Böylece yatırımcı, sistemin karlılığına ve yatırımın geri dönüş süresine ilişkin bir karar verebilir. FV güç santralinin toplam maliyetinin hesaplanması aşağıdaki gibi yapılır [17].

$$\begin{aligned} C_c = & (N_i \times N_s \times N_p \times (P_{M,STC}/1000) \times C_{PV}) \\ & + (N_i \times (P_{rated}/1000) \times C_{inv}) \\ & + (C_{transformer} \times P_{plant, nom} \times 1000) \\ & + (BOS \times P_{plant, nom} \times 1000) \\ & + (C_i \times P_{plant, nom} \times 1000) + (C_{land} \times \Omega_{land}) \end{aligned} \quad (4)$$

Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), ömür boyunca tüm maliyetlerin toplamının, bir enerji santralının ömrü boyunca ürettiği toplam elektrik enerjisiyle bölünmesiyle hesaplanır. Böylece, birim başına enerji maliyetini belirlemeye yardımcı olan standart bir ölçüt oluşturulur. LCOE, farklı enerji üretim teknolojilerinin maliyetlerini karşılaştırmak için kullanılan önemli bir araçtır. LCOE, ömür boyunca maliyetlerin toplamının ömür boyunca üretilen elektrik enerjisinin toplamına oranıdır ve Eşitlik (5) ile hesaplanır [9], [10], [17].

$$LCOE = (C_c + C_m + C_{rep}) / (E_{PLANT} \times 1000) \quad (5)$$

Brüt gelirler (R_{gross}), projenin ömrü boyunca FV santrali tarafından üretilen tüm gelirlerin miktarını ifade eder. Hesaplama, FV santralının işlevsel ömrü boyunca üretilen elektrik enerjisi miktarının elektrik piyasası fiyatı ile çarpımı ile yapılır. Bu oran, seçilen yerin elektrik piyasasına bağlı olarak ve mevcut yardım planları dikkate alınarak değişebilir. Brüt gelirler için kullanılan formül Eşitlik (6)'da verilmiştir. [9], [10]:

$$R_{gross} = P_{electricity} \times E_{PLANT, TOT} \times n \quad (6)$$

Performans oranı (PR), FV güneş enerjisi santralının gerçek performansı ile nominal kapasitesi arasındaki ilişkiyi gösteren bir parametredir. Kullanılan formül Eşitlik (7)'de verilmiştir. [9], [10]:

$$PR (\%) = (E_{PLANT, TOT} / P_{plant, nom} \times G_t \times 10^{-6}) \times 100 \quad (7)$$

Geri ödeme süresi, bir projenin sermayeyi geri kazanması için geçen süreyi hesaplamak için kullanılan bir ölçüttür. Bu süre, projenin başlangıç yatırımının, yıllık gelirlere oranıdır ve Eş. (8) ile hesaplanır.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \text{Toplam yatırım} / \text{Yıllık gelir} \quad (8)$$

Net bugünkü değer (NBD) yöntemi, bir projenin bugünkü değerini hesaplamak için kullanılan bir finansal analiz yöntemidir. Bu yöntem, bir projenin gelecekteki nakit akışlarının bugünkü değerini hesaplayarak, yatırımın toplam getirisini tahmin etmeye çalışır. Eğer NBD, yatırımın bugünkü değerinin pozitif olduğunu gösterirse, proje karlı kabul edilir [18]. Geri ödeme süresi, yatırımın geri kazanılması için geçen süreyi gösterirken, NBD yatırımın toplam getirisini gösterir. Bu nedenle, NBD, bir yatırımın gerçek getirisini belirlemek için kullanışlı bir ölçüt olarak kabul edilir ve Eş. (9) ile hesaplanır. Yaşam döngüsü maliyetlerinin bugünkü değeri ise, bir yatırımın tüm yaşam döngüsü boyunca tahmini tüm maliyetlerini hesaplamak için kullanılır. Bu maliyetler, yatırımın inşası, işletilmesi ve bakımı süresince ortaya çıkan tüm maliyetleri içerir [9], [10], [17].

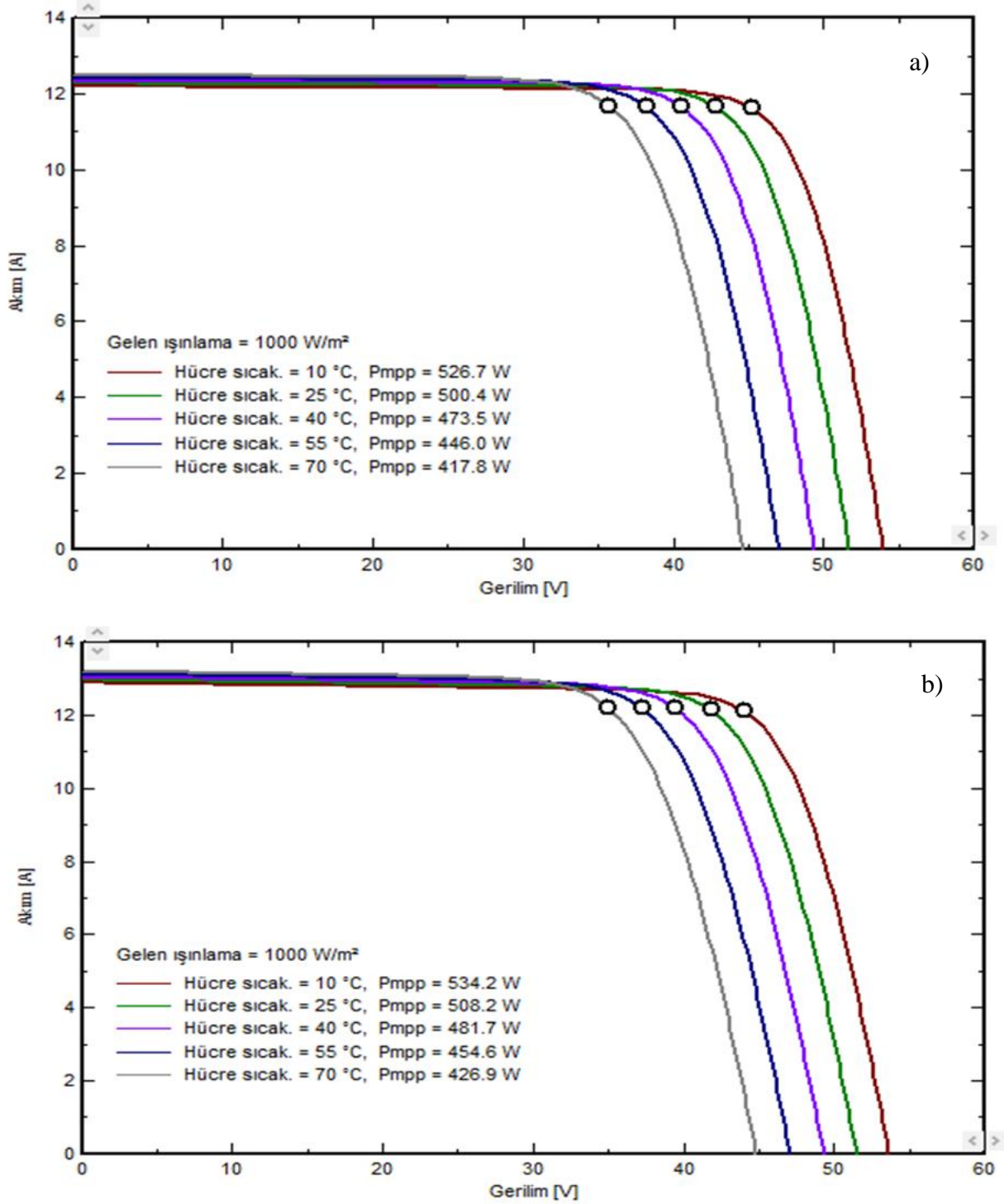
$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{Revenue_t - Costs_t}{(1+r)^t} \quad (9)$$

3. BULGULAR (RESULTS)

Ankara iline kurulması için tasarlanan tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin PVsyst programından elde edilen sonuçları bu bölümde verilmiştir.

3.1. Enerji Analizi (Energy Analysis)

Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerinin enerji analizi, PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.



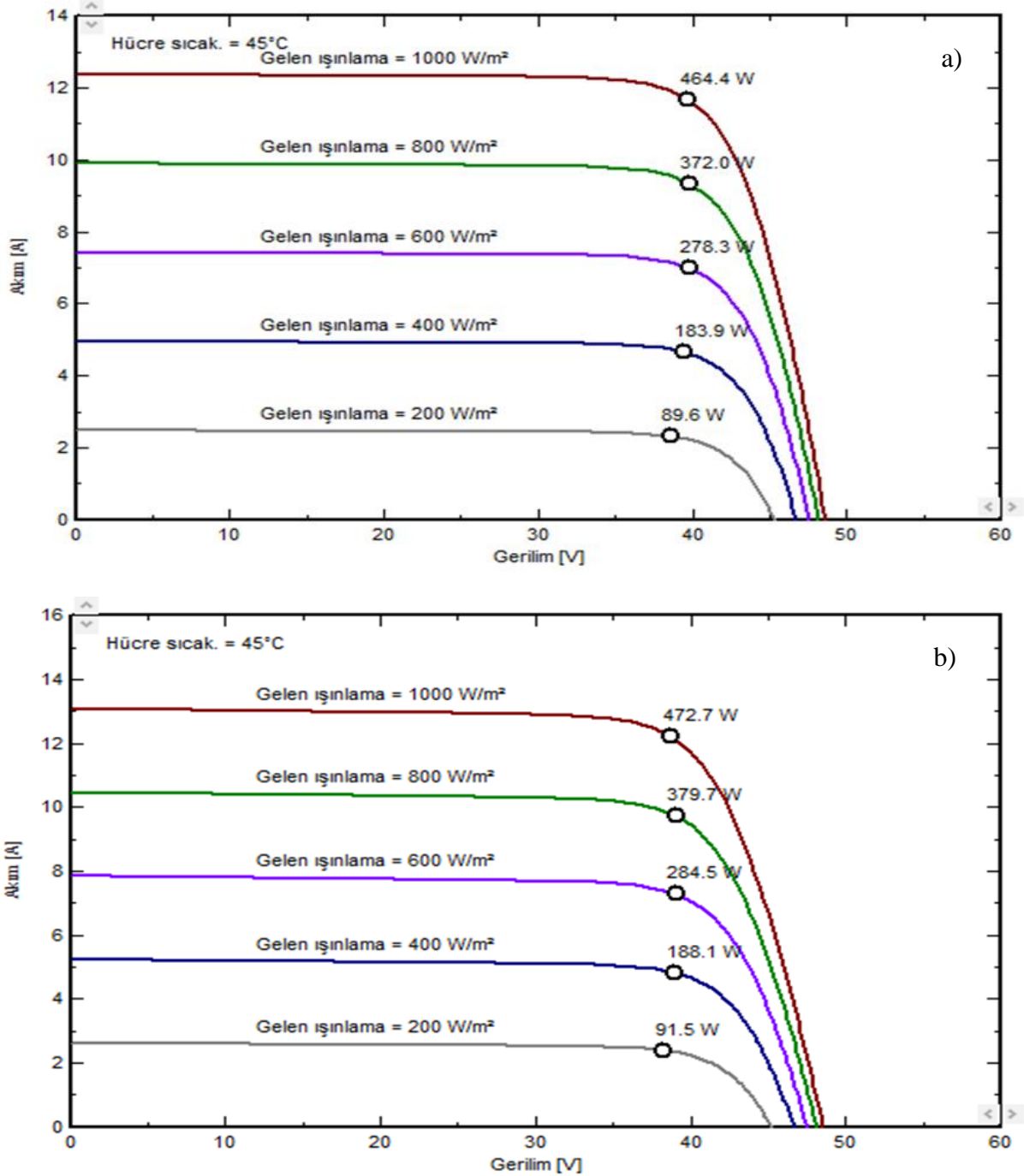
Şekil 2. a) Sıcaklığa bağlı tek yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a temperature-dependent monofacial PV panel) b) Sıcaklığa bağlı çift yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a temperature-dependent bifacial PV panel)

Şekil 2.a'da tek yüzeyli Şekil 2.b'de çift yüzeyli modül için çeşitli hücre sıcaklıklarına dayalı güneş modüllerinin güç çıkışları gösterilmiştir. Tek yüzeyli panelde hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 526,7 W'tan 417,8 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde ise hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 534,2 W'tan 426,9 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli FV panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele

göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, her iki panelin de hücre sıcaklığı arttıkça maksimum güç çıkışı azalır. Hücre sıcaklığı 25°C'de iken, her iki panelin de maksimum güç çıkışı benzerdir. Ancak, hücre sıcaklığı arttıkça çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. I-V eğrilerine bakıldığında, hücre sıcaklığı arttıkça eğriler sol üst köşeye doğru hareket eder. Bu, panelin çıkış gerilimi düştüğünde çıkış akımının ise az miktarda arttığı anlamına gelir.

Ayrıca, çift yüzeyli panelin I-V eğrisi tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir noktada başlar ve daha dik bir eğimle düşer. Bu, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine sahip olduğunu ve daha yüksek bir kısa devre akımı ürettiğini gösterir. Sonuç olarak, hücre sıcaklığı arttıkça, her iki

panelin de maksimum güç çıkışı azalırken, çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine ve daha yüksek bir kısa devre akımına sahip olduğu görülür [9]-[11].



Şekil 3. a) Işınım şiddetine bağlı tek yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a monofacial PV panel depending on the radiation intensity) b) Işınım şiddetine bağlı çift yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of the bifacial PV panel depending on the radiation intensity)

Şekil 3.a'da tek yüzeyli Şekil 3.b'de çift yüzeyli modül için ışınım şiddetine dayalı güneş modüllerinin güç çıkışları gösterilmiştir. Tek yüzeyli panelde gelen ışınım 1000 W/m²'den 200

W/m²'ye düştüğünde, güç çıkışı 464,4 W'tan 89,6 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde gelen ışınım 1000 W/m²'den 200 W/m²'ye düşerken, güç çıkışı 472,7 W'tan 91,5 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli FV panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele

göre yine daha yüksektir. Ayrıca, her iki panelin de ışınım şiddeti arttıkça maksimum güç çıkışı artar. Işınım şiddeti 1000 W/m^2 'de iken, her iki panelin de maksimum güç çıkışı değerleri yakındır. Ancak, ışınım şiddeti azaldıkça çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha

yüksektir. I-V eğrilerine bakıldığında, ışınım şiddeti arttıkça eğriler sağ üst köşeye doğru hareket eder. Bu, panelin çıkış gerilimi arttığında çıkış akımının da arttığı anlamına gelir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin I-V eğrisi tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir

noktada başlar ve daha dik bir eğimle düşer. Bu, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine sahip olduğunu ve daha yüksek bir kısa devre akımı ürettiğini gösterir. Sonuç olarak, ışınım şiddeti arttıkça, her iki panelin de maksimum güç çıkışı artar ve çift yüzeyli panelin maksimum güç

çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine ve daha yüksek bir kısa devre akımına sahip olduğu görülür [9]-[11].

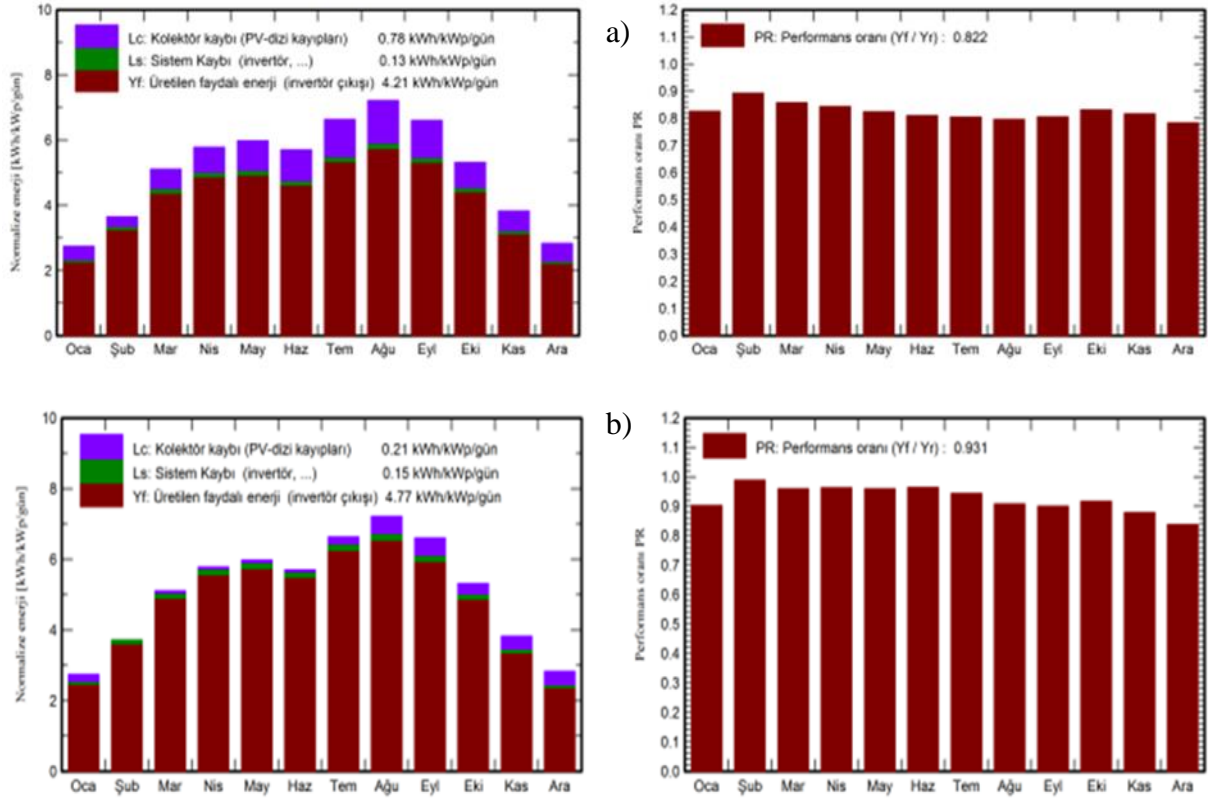
Tablo 3. Tek yüzeyli FV ve çift yüzeyli FV ile oluşturulan özdeş santrallerden elde edilen simülasyon çıktıları (Simulation outputs obtained from identical power plants created with monofacial PV and bifacial PV)

Ay	Tek Yüzeyli FV					Çift Yüzeyli FV				
	G_{GlobInc} (kWh/m ²)	G_{GlobEff} (kWh/m ²)	E_{Array} (MWh)	E_{Grid} (MWh)	PR	G_{GlobInc} (kWh/m ²)	G_{GlobEff} (kWh/m ²)	E_{Array} (MWh)	E_{Grid} (MWh)	PR
Ocak	85	77	6,52	6,32	0,826	85	77,6	7,12	6,90	0,902
Şubat	102,2	95,4	8,48	8,21	0,893	102,2	96,2	9,38	9,09	0,989
Mart	158,3	148,2	12,59	12,21	0,857	158,3	149,7	14,10	13,67	0,959
Nisan	173,3	161,4	13,55	13,16	0,843	173,3	163,6	15,49	15,03	0,963
Mayıs	185,5	172,5	14,17	13,75	0,824	185,5	175,5	16,51	16,02	0,960
Haziran	171	158,1	12,84	12,48	0,810	171	161,3	15,27	14,84	0,964
Temmuz	205,6	191,2	15,33	14,90	0,805	205,6	194,8	17,99	17,47	0,944
Ağustos	223,7	209,3	16,49	16,02	0,796	223,7	212,3	18,82	18,27	0,908
Eylül	198,1	185,9	14,79	14,37	0,806	198,1	187,8	16,54	16,05	0,900
Ekim	164,8	155,2	12,71	12,34	0,832	164,8	156,3	14,02	13,60	0,917
Kasım	114,8	105,9	8,7	8,43	0,816	114,8	106,5	9,36	9,07	0,878
Aralık	87,8	78,9	6,4	6,19	0,783	87,8	79,3	6,84	6,62	0,838
Toplam	1870	1739	142,58	138,36	0,822	1870	1760,8	161,43	156,62	0,931

Tablo 3'te, tek ve çift yüzeyli güneş panellerinin yıllık ortalama DC enerji üretimi ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarları verilmiştir. Bu enerji üretimi, panel yüzeyine düşen güneş ışınımına bağlıdır ve panel yüzeyine düşen etkin küresel ışınım miktarı hesaba katılarak hesaplanmıştır.

Tek yüzeyli panelin kolektöre yansıyan küresel ışınımı (G_{GlobInc}), 1870 kWh/m^2 ve etkin küresel ışınımı (G_{GlobEff}) 1739 kWh/m^2 'dir. Bu ışınım miktarına bağlı olarak, tek yüzeyli panelin yıllık ortalama DC enerji üretimi (E_{Array}) $142,58 \text{ MWh}$ ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarı (E_{Grid})

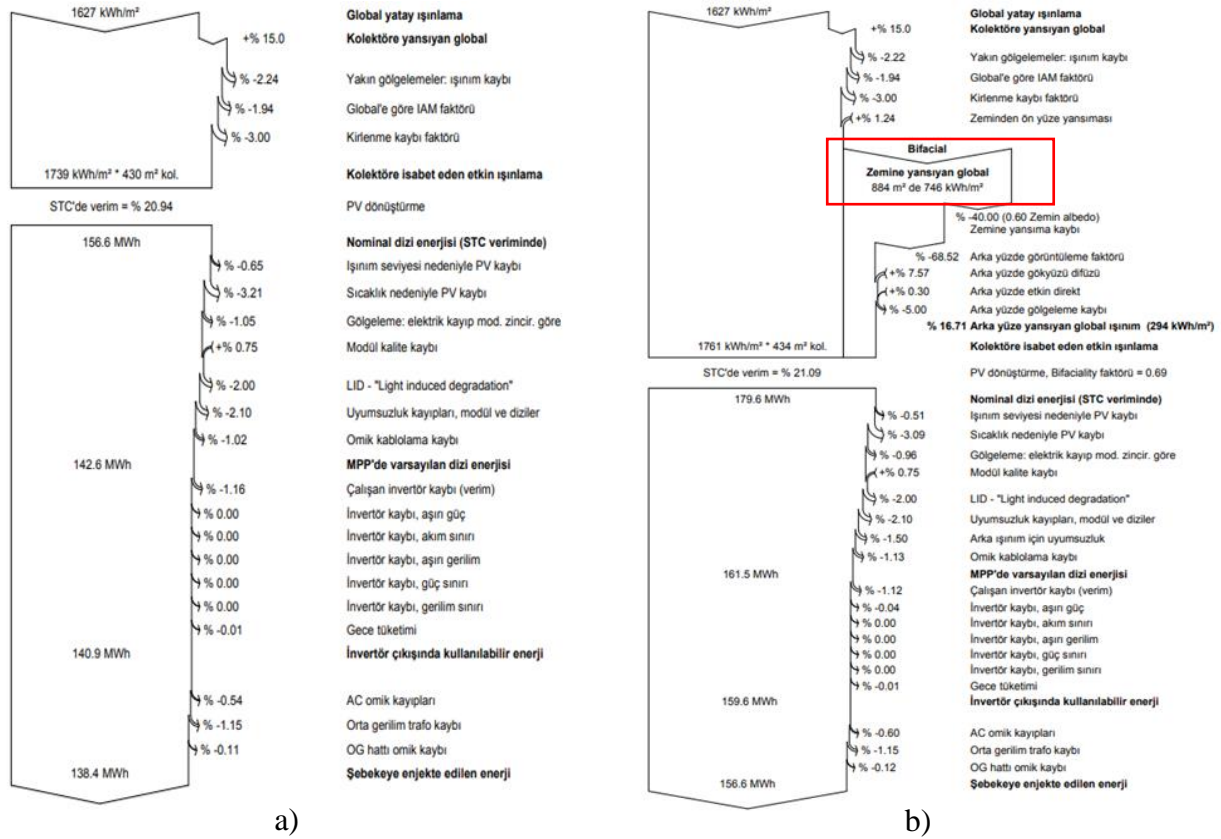
$138,36 \text{ MWh}$ 'dir. Çift yüzeyli panelin kolektöre yansıyan küresel ışınımı, 1870 kWh/m^2 ve etkin küresel ışınımı $1760,8 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Bu ışınım miktarına bağlı olarak, çift yüzeyli panelin yıllık ortalama DC enerji üretimi $161,43 \text{ MWh}$ ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarı $156,62 \text{ MWh}$ 'dir. Ayrıca, tek yüzeyli panelin yıllık ortalama performans oranı (PR) $0,822$ ve çift yüzeyli panelin PR'si $0,931$ olarak hesaplanmıştır. Çift yüzeyli panelin tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir performans gösterdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, güneş panellerinin performansını etkileyen faktörlerin anlaşılması açısından önemlidir.



Şekil 4. a) Tek yüzeyli FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı (Monthly energy production and performance rate of monofacial PV panel) b) Çift yüzeyli FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı eğrisi (Monthly energy production and performance rate curve of bifacial PV panel)

PVsyst programı tarafından elde edilen veriler arasında aylık enerji üretimleri ve sistemin performans oranları gibi kayıpların da belirtildiği önemli veriler bulunmaktadır. Şekil 4.a ve Şekil 4.b, bu verilerin görsel olarak sunulduğu grafiklerdir. Grafiklerde, sistem kayıpları yeşil renk ile, kolektör kayıpları mor renk ile ve üretilen faydalı enerji bordo renk ile gösterilmiştir. Tek yüzeyli panellerde kolektör kaybı, sistem kaybı ve üretilen faydalı enerji sırasıyla 0,78 kWh/kWp/gün, 0,13 kWh/kWp/gün ve 4,21 kWh/kWp/gün olarak ölçülmüştür. Çift yüzeyli panellerde ise, kolektör kaybı, sistem kaybı ve üretilen faydalı enerji

sırasıyla 0,21 kWh/kWp/gün, 0,15 kWh/kWp/gün ve 4,77 kWh/kWp/gün olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panellerin tek yüzeyli panellere kıyasla daha yüksek performans ve daha az kayıp sağladığını göstermektedir. Her iki panel türünde de, modüllerin verimli çalıştığı aylar benzer olduğu için aylık artışlar ve azalmalar da benzer şekildedir. Performans oranları, tek yüzeyli panellerde 0,822 ve çift yüzeyli panellerde 0,931 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panellerin daha yüksek performans oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu bilgi, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve performansının optimize edilmesi için kullanılabilir.



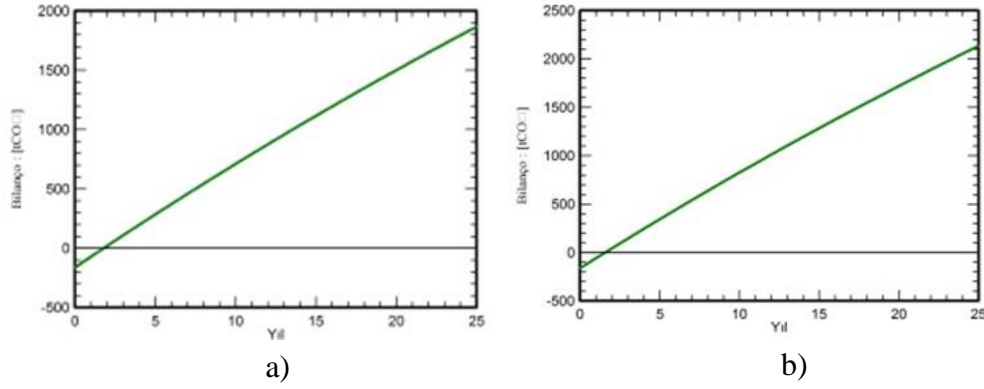
Şekil 5. a) Tek yüzeyli FV panelin kayıp diyagramı (Loss diagram of monofacial PV panel) b) Çift yüzeyli FV panelin kayıp diyagramı (Loss diagram of bifacial PV panel)

Kayıp diyagramı, güneş panellerinin güç çıkışını etkileyen faktörlerin analiz edildiği bir araçtır. Bu faktörler arasında güneş ışınlarının yoğunluğu, panel sıcaklığı, panel yüzey alanı ve özellikleri gibi çeşitli parametreler yer alır. Şekil 5.a ve Şekil 5.b, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin kayıp diyagramlarını göstermektedir. İncelenen diyagramlara göre, her iki güneş enerjisi santralinde de 1627 kWh/m² miktarda küresel yatay ışınım aldığı görülmektedir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellere ulaşan ışınım sırasıyla 1739 kWh/m² ve 1761 kWh/m²'dir. Çift yüzeyli panel modüllerine ulaşan ışınımın daha fazla olması, arka tarafında güneş pilleri bulunması ve zemin yüzeyinin albedo etkisinden kaynaklanmaktadır. Tek yüzeyli panel sistemi, 156,6 MWh dizi enerji üretimi ve 138,4 MWh şebekeye enjekte edilen enerji sağlayacaktır. Çift yüzeyli panel sistemi ise, 179,6 MWh dizi enerji üretimi ve 156,6 MWh şebekeye enjekte edilen enerji sağlayacaktır. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panel sisteminin tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir dizi enerji üretimi ve şebekeye daha fazla enerji enjekte etme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu veriler, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve performans tahminlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Güneş paneli kayıplarının analizi, sistem verimliliğini

arttırmak için tasarım ve bakım süreçlerinde de kullanılabilir.

3.2. Çevresel ve Ekonomik Değerlendirme (Environmental and Economic Evaluation)

Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerinin çevresel ve ekonomik analizi, PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir. Şekil 6.a ve Şekil 6.b, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için CO₂ emisyonları. Bu sonuçlarına göre tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemlerinin kurulmasıyla 25 yıllık proje süresince önlenen karbon emisyonu miktarları sırasıyla 1866,462-ton ve 2134,123-ton olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, FV sistemlerinin ürettiği elektriğin geleneksel elektrik üretim yöntemleri yerine kullanılması durumunda, kaç ton CO₂ emisyonunun önlenmesine katkı sağlayacağını hesaplanması sonucu elde edilmiştir [9]-[11]. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretimi için önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, çevre kirliliği ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir.



Şekil 6. a) Tek yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için CO₂ emisyonları (CO₂ emissions of the monofacial PV panel for the system in the next 25 years) b) Çift yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için CO₂ emisyonları (CO₂ emissions of the bifacial PV panel for the system in the next 25 years)

FV panellerinin kurulumu için 20.000 € öz kaynak bulunmakta ve kalan tutar eşit taksitli 5 yıl ödemeli kredi kullanılarak tamamlanmaktadır. Kurulum maliyetleri, paneller, invertör, arazi bedeli, işçilik ve sigorta bedelleri gibi faktörler dikkate alınarak hesaplanmıştır ve tek yüzeyli paneller için toplam kurulum maliyeti 84.545 €, çift yüzeyli paneller için ise 105.451 € olarak bulunmuştur. Çift yüzeyli bir sistemin kurulum maliyeti, tek yüzeyli bir sistemin kurulum maliyetine göre yaklaşık % 20 daha yüksektir. Ayrıca, geri ödeme süresi hesaplanırken kurulum maliyetleri ve yıllık işletme maliyetleri dikkate alınmıştır. İki sistem için de çalışma ömrü 25 yıl olarak belirlenmiş ve geri ödeme süreleri, tek yüzeyli sistem için 5,8 yıl, çift yüzeyli sistem için ise 5,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, çift yüzeyli sistemin kurulum maliyetinin daha yüksek

olmasına rağmen, daha kısa bir geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, yatırımcılar uzun vadede daha karlı bir seçenek için çift yüzeyli panelleri tercih edebilirler.

4. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA (COMPARISON WITH LITERATURE)

Bu bölümde, çift yüzeyli FV panellerin önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda, deneysel ve sayısal çalışmalara dayalı olarak farklı FV panel tasarımları kullanılarak enerji kazanım oranları araştırılmıştır. Literatür çalışmalarında, farklı FV tasarımları ve albedo oranlarına göre enerji kazanımları Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'te görüldüğü gibi, bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ile uyumludur.

Tablo 4. Bu çalışma ile elde edilen enerji kazancı sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (Comparison of the energy gain results obtained in this study with the literature)

Referans	Araştırma	Konum	Albedo	Eğim (°)/Yön	Enerji kazancı (%)
Bu çalışma	Simülasyon	Ankara, Türkiye	0,6	37/güney	13
Shoukry vd. [19]	Sayısal	Konstanz, Almanya	0,5	37/güney	15,98
Janssen vd. [20]	Simülasyon	Amsterdam, Hollanda	0,5	90/doğu	10,4
Pelaez vd. [21]	Deneysel	Richmond, VA, ABD	0,62	5-40/güney	10-20
Seo vd. [22]	Deneysel	Güney Kore	0,82	30/güney	14,47
Shoukry vd. [23]	Sayısal	Kasese, Uganda	0,5	-/-	17,93
Yusufoglu vd. [24]	Simülasyon	Oslo, Norveç	0,8	46/güney	16,4

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, özdeş model tek yüzeyli ve çift yüzeyli güneş panelleri kullanılarak iki ayrı güneş enerjisi santralının PVsyst simülasyon programı ile

enerji analizi yapılmış ve sonrasında çevresel ve ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, panel tiplerinin hücre sıcaklığı ve ışınım şiddetine göre maksimum güç çıkışı, I-V eğrileri,

açık devre gerilimi ve kısa devre akımı gibi özelliklerini karşılaştırmaktadır.

• Tek yüzeyli panelde hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 526,7 W'tan 417,8 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde ise hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 534,2 W'tan 426,9 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panellerin maksimum güç çıkışının tek yüzeyli panellere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.

• Çift yüzeyli panellerin yıllık ortalama enerji üretiminin, tek yüzeyli panellere göre %13 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bir güneş enerjisi projesi için, çift yüzeyli panellerin tercih edilmesinin daha verimli olabileceği düşünülebilir.

• Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemlerinin kurulmasıyla 25 yıllık proje süresince önlenen karbon emisyonu miktarları sırasıyla 1866,462 ton ve 2134,123 ton olarak belirlenmiştir. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretimi için önemli olduğunu vurgulamaktadır.

• İki sistem için de çalışma ömrü 25 yıl olarak belirlenmiş ve geri ödeme süreleri, tek yüzeyli sistem için 5,8 yıl, çift yüzeyli sistem için ise 5,4 yıl olarak hesaplanmıştır.

• Sonuç olarak, bu çalışma çift yüzeyli güneş paneli sistemlerinin verimliliği ve çevresel faydaları nedeniyle tek yüzeyli sistemlere göre daha yaygın hale getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] İnternet: Yeşil Mutabakat. Web: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat> adresinden 4 Mart 2023'te alınmıştır.

[2] Aksoy M. H. ve Çalık M. K. (2022) Performance Investigation Of Bifacial Photovoltaic Panels At Different Ground Conditions. Konya Journal of Engineering Sciences, 10(3), 704–718.

[3] Morales Pedraza J. Solar energy for electricity generation. (2022). Elsevier, Non-Conventional Energy in North America. 137–174.

[4] Yük tevzi dairesi başkanlığı. (2023). Kurulu Güç Raporları -Mart 2023. <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> adresinden erişildi.

[5] Varış, Ç. (2017). Çift eksenli güneş takip sisteminin pilot uygulaması, üretim değerlendirme ve ekonomik analizi, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-40

[6] Baqir M. ve Channi H. K. (2022). Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. Mater Today Proc, 48(5). 1332–1338.

[7] Khatib T. Mohamed A. ve Sopian K. (2012). A software tool for optimal sizing of PV systems in Malaysia. Modelling and Simulation in Engineering, 11.

[8] Muthu V. ve Ramadas G. (2023) Performance studies of Bifacial solar photovoltaic module installed at different orientations: Energy, Exergy, Enviroeconomic, and Exergo-Enviroeconomic analysis. Environmental Science and Pollution Research, 30, 62704–62715.

[9] Abdalla S. N. M. ve Özcan H. (2021). Design and simulation of a 1-GWp solar photovoltaic power station in Sudan. Clean Energy, 5(1), 57–78.

[10] Çalık M. K. (2023). Çift yüzeyli fotovoltaik panellerin farklı zemin koşullarında incelenmesi. <https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/3519> adresinden erişildi.

[11] Prasad M. ve Prasad R. (2023). Bifacial vs monofacial grid-connected solar photovoltaic for small islands: A case study of Fiji. Renew Energy, 203, 686–702.

[12] Mohamed N. S. S. Sulaiman S. I. ve Rahim S. R. A. (2022). Design of ground-mounted grid-connected photovoltaic system with bifacial modules using PVsyst software. J Phys Conf Ser, 2312(1), 12058.

[13] Türkdöğru E. ve Kutay M. (2022). Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYSY software. Journal of Energy Systems, 6(4), 543–559.

[14] Makalesi A. Akcan E. Kuncan M. ve Minaz R. (2020). PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 18, 248–261.

- [15] İnternet: Meteonorm Version 8. Web: <https://meteonorm.com/meteonorm-version-8> adresinden 04 Mayıs 2023'te alınmıştır.
- [16] Garg T. P. A. Kazunari K. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2.
- [17] Roca A. (2018). Design and Modelling of a Large-Scale PV Plant. 95.
- [18] Batista R. V. F. (2018). The impact of shadowing in photovoltaic systems and how to minimizing it. 1–57.
- [19] Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., & Werner, J. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, 92, 600-608.
- [20] Janssen, G. J., Van Aken, B. B., Carr, A. J., & Mewe, A. A. (2015). Outdoor Performance of Bifacial Modules by Measurements and Modelling. *Energy Procedia*, 77, 364-373.
- [21] S. A. Pelaez, C. Deline, S. M. MacAlpine, B. Marion, J. S. Stein ve R. K. Kostuk (2019). Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(1). 82-88.
- [22] Y. Seo et al. (2019). Effect of Front Irradiance and Albedo on Bifacial Gain in 1.8kW Bifacial Silicon Photovoltaic System. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, ABD, 1298-1301.
- [23] Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., & Werner, J. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, 92, 600-608.
- [24] U. A. Yusufoglu, T. M. Pletzer, L. J. Koduvelikulathu, C. Comparotto, R. Kopecek and H. Kurz. (2015). Analysis of the Annual Performance of Bifacial Modules and Optimization Methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 5(1). 320-328.

The Effect of High Pressure Die-Casting Machine's Parameters on the Mechanical Properties of the Aluminium Alloy Material

Emre AKKAYA^{1*} , Yunus KAYIR² 

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

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/11/2022
Revision: 30/03/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Aluminium
High Pressure Die Casting
Factorial Design
Mechanical Properties
Design of Experiment
Analysis of Variance

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/11/2022
Düzeltilme: 30/03/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Alüminyum
Yüksek Basıncılı Döküm
Faktöriyel tasarım
Mekanik Özellikler
Deney Tasarımı
Varyans Analizi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In the study, firstly, the part and raw material to be tested were determined, then the injection production parameters were determined and production was made, and at the end, the data were analyzed with statistical analysis. / Çalışmada ilk olarak deney yapılacak parça ve hammadde belirlenmiş, daha sonra enjeksiyon üretime parametreleri belirlenerek üretim yapılmış ve sonunda ise istatistiksel analiz ile veriler analiz edilmiştir.

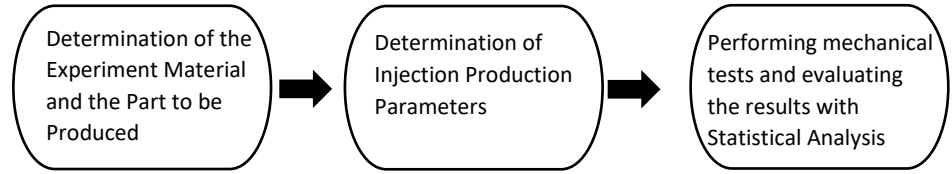


Figure A: WorkFlow / Şekil A: Çalışma Akışı

Highlights (Önemli noktalar)

- Aluminium injection / Alüminyum enjeksiyon
- Full factorial design of experiment / Tam faktöriyel deney tasarımı
- Interpretation of experiment data with statistical analysis / İstatistiksel analiz ile deney verilerinin yorumlanması

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to see the effect of aluminum injection parameters on the mechanical properties of the material used. / Çalışmada alüminyum enjeksiyon parametrelerinin kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin görülmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): While determining the injection parameters in the study, the full factorial experimental design method was used, and the obtained values were evaluated by analysis of variance. / Çalışmada enjeksiyon parametreleri belirlenirken tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmış ve elde edilen değerler varyans analizi ile değerlendirilmiştir.

Results (Bulgular): According to the main effects graph, when the molten metal temperature is 725 °C, the injection speed is 4.0 m/s, and the mold opening time is 10 s, the best hardness value is obtained, the molten metal temperature is 725 °C, the injection speed is 2.6 m/s, and the mold opening time is 15 s. the best tensile strength was obtained. / Ana etkiler grafiğine göre ergimiş metal sıcaklığı 725 °C, enjeksiyon hızı 4,0 m/s ve kalıp açma süresi 10 s olduğunda en iyi sertlik değerinin, ergimiş metal sıcaklığı 725 °C, enjeksiyon hızı 2,6 m/s ve kalıp açma süresi 15 s olduğunda ise en iyi çekme dayanımı elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): As a result of the statistical analyzes, it was seen that the molten metal temperature (725 °C) was the parameter that most affected both hardness and tensile strength. /Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, ergimiş metal sıcaklığının (725 °C) hem sertlik hem de çekme dayanımını en çok etkileyen parametre olduğu görülmüştür.



The Effect of High Pressure Die-Casting Machine's Parameters on the Mechanical Properties of the Aluminium Alloy Material

Emre AKKAYA^{1*} , Yunus KAYIR²

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

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/11/2022
Revision: 30/03/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Aluminium
High Pressure Die
Casting
Factorial Design
Mechanical Properties
Design of Experiment
Analysis of Variance

Abstract

Aluminium is one of the fundamental materials used in many sectors, such as, automotive, defence, aviation, etc. Generally, aluminium parts are formed by using die-casting methods in manufacturing industry. Machines, which are used, for die-casting process have many parameters that affect the molded parts' mechanical properties. In this study, the effect of casting parameters on the mechanical properties of used material was investigated. A test part that is manufactured currently on a die-casting machine in a sector was found out to do experimental works. An aluminum alloy, named $AlSi_{12}Cu$ (EN AC 47000), that is used widely in die-casting techniques was preferred. Three parameters, such as, metal injection velocity (m/s), time of the die opening (s) and molten metal temperature ($^{\circ}C$), were selected. In addition, 27 test parts that were determined by the full factorial experimental design method were manufactured for the molding parameters. Moreover, some mechanical tests, hardness and tensile, were performed on the parts. The test data were analysed with the full factorial and ANOVA statistical methods. As a results of the analysis, the highest hardness value was obtained as 85 HB when the molten metal temperature was $750^{\circ}C$, the injection velocity was 1,3 m/s and the mold opening time was 10 s. The maximum value of the tensile strength was gotten as 264 MPa in the parameters that are the molten metal temperature $725^{\circ}C$, injection velocity 4 m/s and the mold opening time was 12 s.

Yüksek Basıncılı Döküm Makinesi Parametrelerinin Alüminyum Alaşım Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisi.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/11/2022
Düzeltilme: 30/03/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Alüminyum
Yüksek Basıncılı Döküm
Faktöriyel tasarım
Mekanik Özellikler
Deney Tasarımı
Varyans Analizi

Öz

Alüminyum, otomotiv, savunma, havacılık vb. birçok sektörde kullanılan temel malzemelerden biridir. İmalat sanayinde genellikle basınçlı döküm yöntemleri kullanılarak alüminyum parçalar oluşturulmaktadır. Basınçlı döküm işleminde kullanılan makineler, kalıplanan parçaların mekanik özelliklerini etkileyen birçok parametreye sahiptir. Bu çalışmada döküm parametrelerinin kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Halihazırda bir sektörde basınçlı döküm makinesinde imal edilen bir test parçasına deneysel çalışmalar yapılmıştır. Basınçlı döküm tekniklerinde yaygın olarak kullanılan $AlSi_{12}Cu$ (EN AC 47000) adlı alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Metal enjeksiyon hızı (m/s), kalıp açma süresi (s) ve ergimiş metal sıcaklığı ($^{\circ}C$) gibi üç parametre seçilmiştir. Ayrıca kalıplama parametreleri için tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile belirlenen 27 adet test parçası üretilmiştir. Ayrıca parçalar üzerinde sertlik ve çekme gibi bazı mekanik testler yapılmıştır. Test verileri tam faktöriyel ve ANOVA istatistiksel yöntemleri ile analiz edildi. Analiz sonucunda ergimiş metal sıcaklığı $750^{\circ}C$, enjeksiyon hızı 1,3 m/s ve kalıp açma süresi 10 s olduğunda en yüksek sertlik değeri 85 HB olarak elde edilmiştir. Erimiş metal sıcaklığı $725^{\circ}C$, enjeksiyon hızı 4 m/s ve kalıp açma süresi 12 s olan parametrelerde çekme dayanımının maksimum değeri 264 MPa olarak elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aluminium that is one of the main materials is preferred in many industries because of that it is abundant in nature, cheap and soft, as well as cost effective price. There are many methods, such as

extrusion, rolling and casting, etc. to form aluminium alloy materials Especially, aluminium injection method is preferred in high volume production sectors such as automotive and defence industries [1]. As it is possible to manufacture complex-shape and thin-section parts by the high-

pressure casting method. The aluminium injection method is also known die casting process. In this technique, the desired parts can be manufactured in high quantity and the closest to the final product by injecting molten metal into the metal mold at high pressure [2]. Normally, aluminium has low strength and soft when it is pure state. For this reason, different types of aluminium alloys are formed by adding some elements into it to improve strength, resistance and castability properties. The basic elements for aluminum alloys are Zn, Cu, Mn, Mg, Si and Fe. These elements affect strength and other mechanical, metallurgical properties of the formed alloy [1]. There are two main factors that greatly affect the quality of the molded parts [3]. One of them is distribution rate of the molten metal in the die and the other is the temperature of the mold. Moreover, there are three phases in the high-pressure casting process. In the first phase, the molten metal is slowly transmitted to the sprue inlet of the mold, and in the second phase, the molten metal is injected into the die under high pressure. In the third phase, the solidification process of the molten metal is completed by high pressure. The high-pressure die-casting machines are divided into two as cold and hot chamber machines according to the different production systems. The chamber is where the molten metal is injected into the mold by means of pistons in the die-cast machine [4]. In cold chamber pressure casting machines, molten metal is filled into the chamber with a ladle. In hot chamber die casting machines,

the molten metal furnace is located inside the machine [5]. In this study, the effect of the injection production parameters of the EN AC 47000 (AlSi₁₂(Cu)) which is used in aluminium injection machines on the mechanical properties of the material was investigated.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, mechanical tests were carried out on the aluminum parts molded in the parameters determined in the high pressure die casting machine. Experimental results were analyzed using full factorial design and ANOVA methods.

2.1. Test Parts (Test Parçaları)

Aluminium alloy that is coded EN AC 47000 were selected a raw material that is called ingot for casting process on metal injection molding machine. Hardness values of the ingot were measured before melting. Hardness values were measured between 60 and 70 HB. EN AC 47000 aluminium alloy, which chemical content is specified in Table 1. The geometry of test parts were determined according to the mechanical tests, such as tensile. The tensile test specimens were cut out the parts.

Table 1. EN AC 47000 Aluminium alloy chemical content (EN AC 4700 Kimyasal içerik)

Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
Remain	1,00	11,50-13,50	0,20	0,30	0,20	0,10	0,10	0,15	0,10	0,05

In the die-casting process, the molten metal temperature, injection speed and mold opening time were determined as injection parameters by taking into account the literature review [6] [3] [7]. The selected parameters are shown in Table 2.

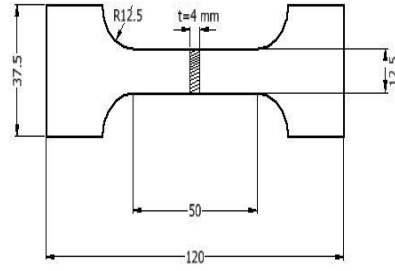
Table 2. Injection production parameters (Enjeksiyon üretim parametreleri)

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Injection Velocity (m/s)	1,3	2,6	4
Mold Opening Time(s)	10	12	15
Molten Metal Temperature (°C)	700	725	750

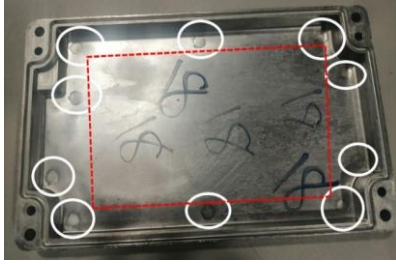
According to the defined injection parameters, normally 27 (3*3*3) test parts have to need in this works. However, 54 (27*2) test parts were molded because of some problems that can be occurred in this experimental works. The cold chamber die-casting machine, which is seen in Figure 1-a, was used to manufacture all test samples. The mold temperature was kept constant during the pressing of the test samples. When the parts were removed from the die, they were left to cool at room temperature.



a)



b)



b)



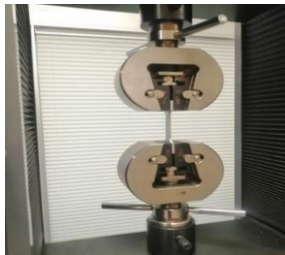
c)

Figure 1. High pressure die-casting machine (a) and molded part (b) (Yüksek basınçlı döküm makinesi ve kalıplanan parça)

The dimensions of the test parts are 260x160x20 mm. While performing the mechanical tests, the specimens were cut out from a detected area on the parts. Where the traces of the ejector pin used to remove the part from the mold in the injection process, these regions are shown with a red dashed line in Figure 1-b, the area of the region is 160 x115 mm, and the thickness is 4 mm.

2.2. Mechanical Tests (Mekanik Testler)

According to the TS EN ISO 6892-1 standard, the tensile specimens were extracted from the test parts by using a CNC vertical machining tool. All the tensile tests were carried out at room temperature, at a tensile speed of 1 mm/min with a MITECH brand tensile device. Figure 2-a shows the test sample connected on the tensile device.



a)

Figure 2. Tensile testing device and specimen: a) Tensile device b) Technical drawing of test dpecimen, c) Cutting the test specimen out the molded part (Çekme testi cihazı ve numune: a)Çekme cihazı, b) Çekme numunesi teknik resmi, c) Çekme numunesinin kalıplanan parçadan çıkarılması)

The hardness tests were carried out for the test specimens. The measurement hardness was performed by using Brinell method. The molded parts' hardness was measured with a device in two times. As the hardness of the material was controlled for three different regions on the molded part (marked with circles in Figure 3), the average values were calculated for these tests' values.



Figure 3. Hardness test areas (Sertlik testi bölgeleri)

2.3. Factorial Method (Faktöriyel Metod)

The factorial experimental design method is an effective technique for estimating the main effects on the test results. In addition, the application of this method is quite easy in experimental works that need optimization [9]. In the full factorial experiment design method, the experiment costs and experiment times increase as the combinations of all the levels of the factors are tried one by one. To summarize briefly, there is maximum time and cost in full factorial experimental design. While designing the experiment, the connection between the data to be obtained from the experiment and the cost and time spent should be analyzed very well. In order to save cost and time, the fractional factorial experiment design method is obtained by proportionally reducing the number of experiments [14]. The most important feature of the full factorial design is that it examines the effect of the interaction of factors on the output [10]. It is seen that some methods, for example the variance (ANOVA) and regression analysis, are also used together with full factorial design. The variance analysis is used to determine the degree of impact of factors on output, and regression analysis is used to determine the mathematical relationship of inputs and output data [11]. Other useful exploratory analysis tools for factorial experiments include main effects plots, interaction plots, Pareto plots, and a normal probability plot of the estimated effects. Thus, the full factorial experimental design method was preferred in this study.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In this section, the relation of the parameters, used on injection press machine, with the mechanical tests' results, hardness and tensile, was figured out. The experiments were organized by using full factorial method. ($3^3 \times 2$) 54 different experiments are required since it is desired to examine 3 different factors with 3 levels and 2 repetitions. The purpose of performing the experiments in duplicate is to minimize the effect of uncontrollable external factors on the input parameters with the full factorial experimental design. Full factorial experimental design is shown in Table 3. After tests, the values of the hardness and the tensile tests were analysed with tools in full factorial experimental design.

Table 3. Full factorial experimental design (Tam faktöriyel deney tasarımı)

Specimen	Molten Metal Temperature (°C)	Injection Velocity(m/s)	Mold Opening Time (s)
1	700	4	10
2	700	4	12
3	700	4	15
4	700	2,6	10
5	700	2,6	12
6	700	2,6	15
7	700	1,3	10
8	700	1,3	12
9	700	1,3	15
10	725	4	10
11	725	4	12
12	725	4	15
13	725	2,6	10
14	725	2,6	12
15	725	2,6	15
16	725	1,3	10
17	725	1,3	12
18	725	1,3	15
19	750	4	10
20	750	4	12
21	750	4	15
22	750	2,6	10
23	750	2,6	12
24	750	2,6	15
25	750	1,3	10
26	750	1,3	12
27	750	1,3	15
28	700	4	10
29	700	4	12
30	700	4	15
31	700	2,6	10
32	700	2,6	12
33	700	2,6	15
34	700	1,3	10
35	700	1,3	12
36	700	1,3	15
37	725	4	10
38	725	4	12
39	725	4	15
40	725	2,6	10
41	725	2,6	12
42	725	2,6	15
43	725	1,3	10
44	725	1,3	12
45	725	1,3	15
46	750	4	10
47	750	4	12
48	750	4	15
49	750	2,6	10
50	750	2,6	12
51	750	2,6	15
52	750	1,3	10
53	750	1,3	12
54	750	1,3	15

3.1. Hardness Tests (Sertlik Testi)

The results of the hardness tests were analysed by using the method of full factorial experiment design. The purpose of analysis with factorial experimental design is to determine the impact of factors on the response variable interactively.

Table 4. Analysis of variance (Varyans analizi)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	1052,55	40,483	6,46	0,000
Linear	6	671,65	111,942	17,85	0,000
Temp	2	474,94	237,470	37,87	0,000
Velocity	2	29,19	14,594	2,33	0,117
Time	2	167,52	83,760	13,36	0,000
2-Way Interactions	12	290,91	24,242	3,87	0,002
Temp*Velocity	4	106,05	26,512	4,23	0,009
Temp*Time	4	75,11	18,776	2,99	0,036
Velocity*Time	4	109,75	27,439	4,38	0,007
3-Way Interactions	8	89,99	11,248	1,79	0,122
Temp*Velocity*Time	8	89,99	11,248	1,79	0,122
Error	27	169,32	6,271		
Total	53	1221,86			

The variance analysis results are given in Table 4. Each Factors affecting the hardness values were evaluated according to the *P* value that significance level was taken into account 5% ($\alpha=0.05$). It is seen that the factors whose *P* value is below the significance level and the binary interactions affect the hardness value statistically. According to *P* values, the temperature, the time, velocity*time, temperature*velocity, temperature*time factors and interactions affect the hardness of the material. According to the sum of squares values, the factors and their effects are shown in Table 5.

Table 5. Hardness values sum of squares ratio (Sertlik testi kareler toplamı oranı)

Temperature	38,87%
Velocity	2,37%
Time	13,71%
Temperature*Velocity	8,67%
Temperature*Time	6,14%
Velocity*Time	8,98%
Temperature*Velocity*Time	7,36%

It is seen in Figure 4 that the factors and interactions that exceed the threshold value (2,052) in the Pareto chart affect the response variable. Temperature is the most important factor affecting the response variable according to the Pareto graph. This result was reached because the standardized effect value in the graph was at the highest temperature factor. After determining the degrees of freedom of the factors, the *t* table is checked for the threshold value. Standardized effects are *t* statistics that test the zero hypothesis that the effect is zero. The zero hypothesis is an assumption used in statistics that suggests that there is no difference between certain features of the data generation process. [12] The threshold value in the Pareto chart is calculated automatically by the statistical analysis program (Figure 6). To summarize, it is seen in the Pareto chart that the factors exceeding the threshold value and the interactions of the factors have an effect on the output.

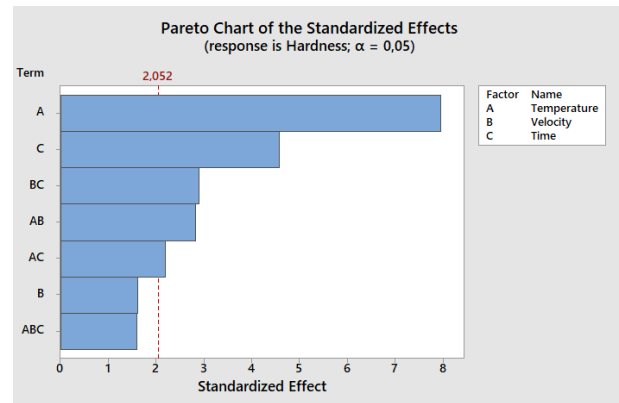


Figure 4. Pareto chart for hardness values (Sertlik testi pareto grafiği)

When the experimental design model was examined, it was seen that the R-sq value was 86,14% and the R-sq (adj) value was 72,80%. The high R-sq value indicates that the obtained data explains the experimental design model. The main effects graph is used to obtain information about the single effects of each factor on the output.[15] The main effects plot shown in Figure 5 has been

reviewed to determine factors that have an effect on hardness value. According to the graph, the highest hardness values were obtained when the molten metal temperature was 725 °C, the velocity of injection was 4 m/s, and the mold opening time was 10 s.

In addition, the 3D graphics shown in Figure 6 have been drawn to visualize and better understand the effect of molding factors on the output. Each of these graphs shows the effect of 2 different input parameters on the output. It is seen that the temperature of the material, 725, is the most effective parameter in the 3D plots.

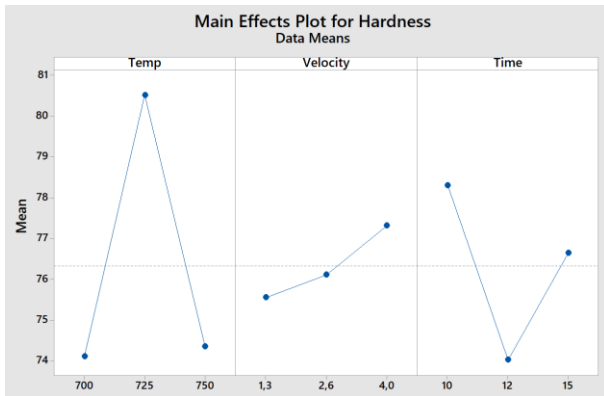


Figure 5. Main effects plot for hardness test (Sertlik testi ana etkiler grafiği)

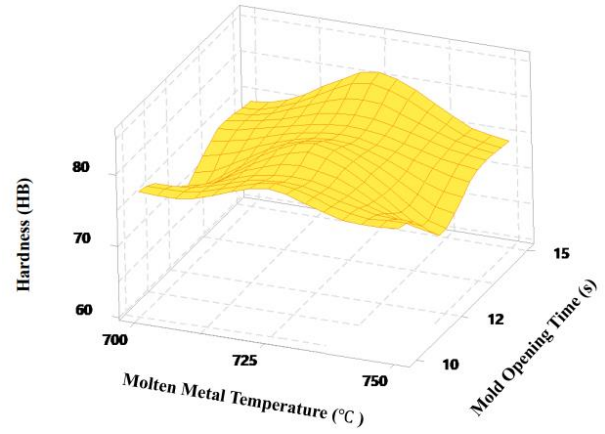
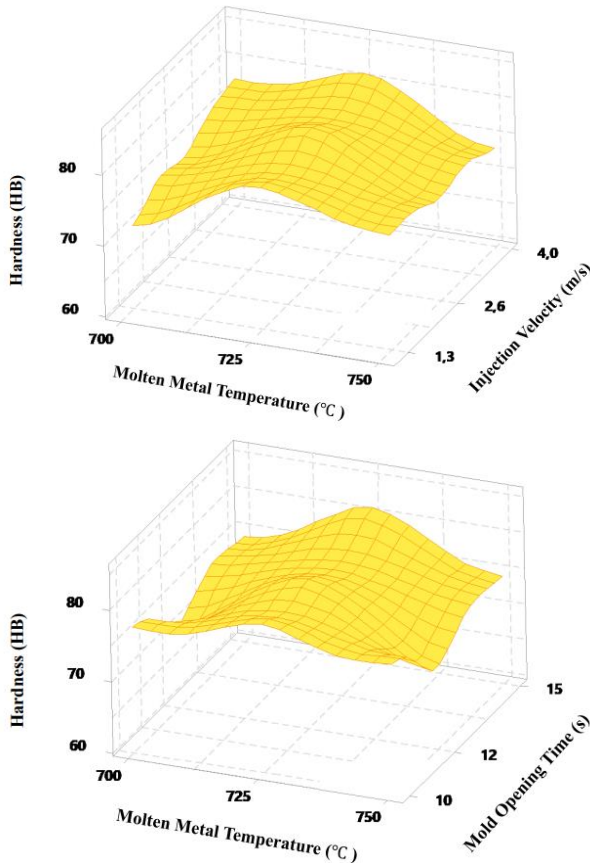


Figure 6. 3D Interaction plots for hardness test (Sertlik testi 3D etkileşim grafikleri)

3.2. Tensile Test (Çekme Testi)

Two tensile specimens were extracted from each test parts formed according to 27 different injection parameters. So, that means, the tensile test was done two times for each test parts. A sample specimen for tensile test is shown in Figure 7.



Figure 7. Sample specimen for tensile test (Çekme testi örnek numune)

The tensile values were analysed with the full factorial experimental design method. For example, the results shown in Table 6 were obtained from the variance analysis.

Table 6. Analysis of variance (Varyans analizi)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	25128,5	966,48	18,60	0,000
Linear	6	11229,0	1871,50	36,02	0,000
Temp	2	9089,8	4544,91	87,46	0,000
Velocity	2	511,8	255,91	4,92	0,015
Time	2	1627,4	813,69	15,66	0,000

Continuation of Table 6.

2-Way Interactions	1 2	5101, 4	425,1 2	8,1 8	0,0 00
Temp*Velocity	4	1221, 9	305,4 6	5,8 8	0,0 02
Temp*Time	4	1866, 3	466,5 7	8,9 8	0,0 00
Velocity*Time	4	2013, 3	503,3 2	9,6 9	0,0 00
3-Way Interactions	8	8798, 0	1099, 75	21, 16	0,0 00
Temp*Velocity*Time	8	8798, 0	1099, 75	21, 16	0,0 00
Error	2 7	1403, 0	51,96		
Total	5 3	2653 1,5			

While evaluating the factors affecting the tensile strength value according to the *P* value, the significance level of 5% ($\alpha = 0.05$) was considered into account. It has been concluded that the factors and interactions whose *P* value is below the significance level affect the tensile strength value statistically. According to the *P* values, it is seen that all factors and interactions affect the tensile strength of the material. According to the sum of squares values, the factors and their effects are shown in Table 7.

Table 7. Tensile strength values sum of squares ratio (Çekme mukavemeti kareler toplamı oranı)

Temperature	34,26%
Velocity	1,92%,
Time	6,13%
Temperature*Velocity	4,60%
Temperature*Time	7,03%
Velocity*Time	7,58%
Temperature*Velocity*Time	33,16%

It is seen in Figure 8 that the factors and interactions that exceed the threshold value (2,05) in the Pareto chart affect the response variable. In the pareto chart shown in Figure 8, it is seen that the temperature factor is the parameter that most affects the tensile strength. This result was reached because the

standardized effect value in the graph was at the highest temperature factor. After determining the degrees of freedom of the factors, the *t* table is checked for the threshold value. Standardized effects are *t* statistics that test the zero hypothesis that the effect is zero. The zero hypothesis is an assumption used in statistics that suggests that there is no difference between certain features of the data generation process. [12] The threshold value in the Pareto chart is calculated automatically by the statistical analysis program (Figure 8). To summarize, it is seen in the Pareto chart that the factors exceeding the threshold value and the interactions of the factors have an effect on the output.

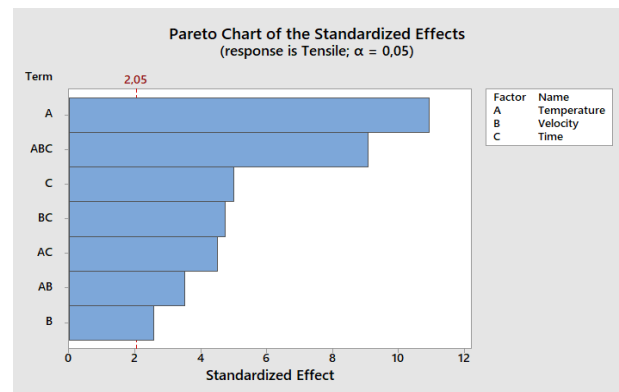


Figure 8. Pareto chart for tensile strength (Çekme mukavemeti pareto grafiği)

When the experimental design model was examined, it was seen that the *R*-sq value was 94,71% and the *R*-sq (adj) value was 89,62%. The high *R*-sq value indicates that the obtained data explains the experimental design model.

The main effects plot also is shown in Figure 9. According to the graph, the highest tensile strength values were obtained when the molten metal temperature was 725 °C, the injection velocity was 2.6 m/s, and the mold opening time was 15 s.

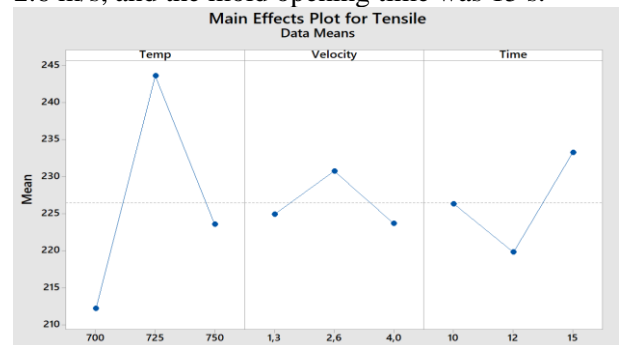


Figure 9. Main effects plot for tensile test (Çekme testi ana etkiler grafiği)

In addition, the 3D graphics shown in Figure 10 have been drawn in order to visualize and better understand the effect of molding factors on the output. Each of these graphs shows the effect of 2 different input parameters on the output. It is seen that the temperature of the material, 725, is the most effective parameter in the 3D plots.

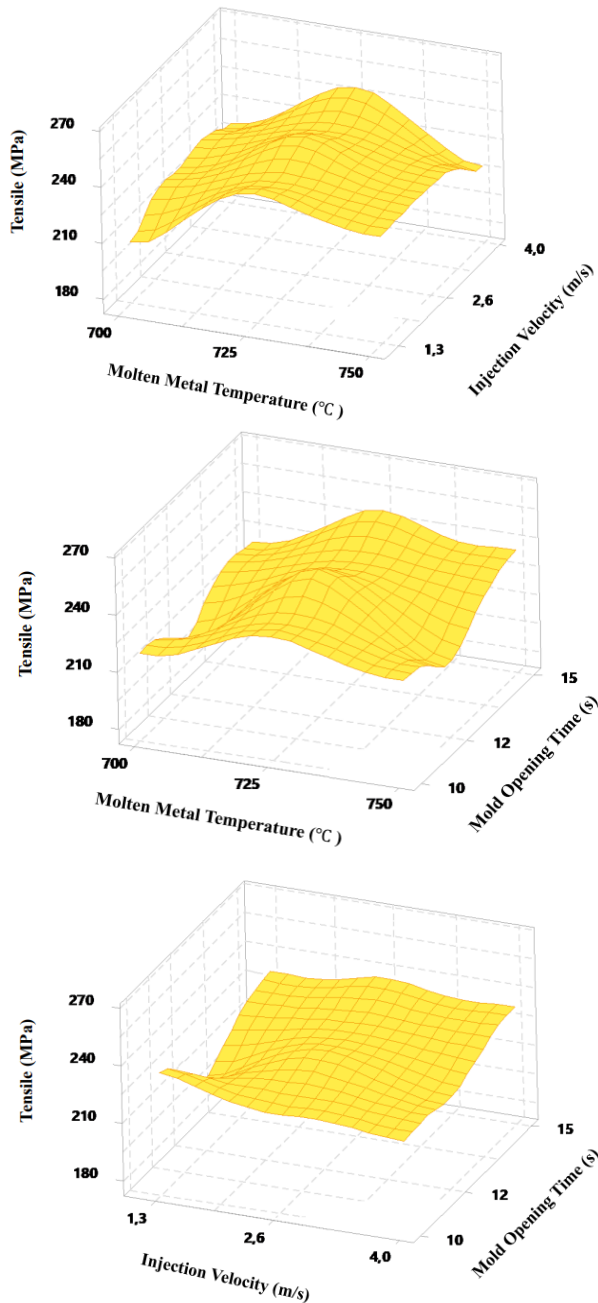


Figure 10. 3D Interaction plots for tensile test (Çekme testi 3D etkileşim grafikleri)

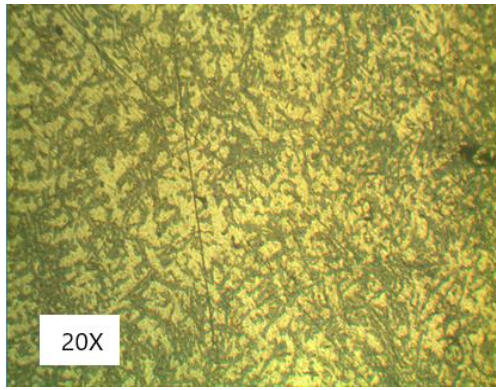
As a result of the experiments, it has been seen that the parameter that has a great effect on the material strength is the molten metal temperature. When the literature is examined, it has been seen in a previous study that the casting temperature is the parameter that most affects the strength of the product

produced by high pressure die casting method using magnesium alloys [5]. In another study, it was observed that the probability of gas porosity increases in the samples produced when the casting temperature is too low. With the increase of gas porosity, the strength of the produced material decreases [13].

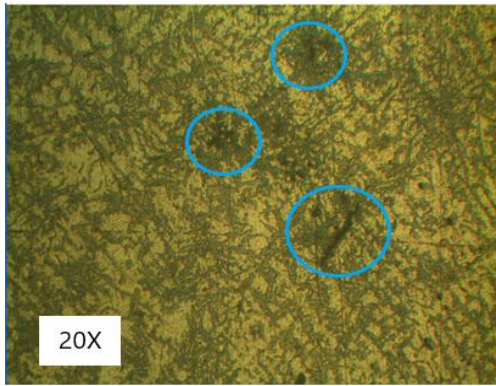
Although no generalization can be made for the hardness and tensile test results, some inferences can be made. When the tensile test specimens were examined, it was observed that there was porosity in the inner parts of the fractured areas. When Figure 9 is examined, it is seen that the worst strength is obtained when the injection speed is 4 m/s, and the best strength is obtained when it is 2,6 m/s. Porosity formation directly affects the strength of the materials. These results similar to results of Koru and Serçe's study. In their study, they stated that 3 and 5 m/s injection velocity parameters increased the formation of porosity, and 2 m/s injection velocity value could be used instead [3].

Increasing the temperature of the molten metal reduces the formation of porosity as it also increases the fluidity of the material, and accordingly, it positively affects the mechanical properties (hardness, tensile strength) of the material. The best strength was obtained at a temperature of 725 degrees in both hardness and breaking strength values. At a temperature of 750 degrees, a decrease in mechanical properties observed. It is thought that this situation is caused by the increase in the amount of oxygen entering between the grains with the increase in temperature and the formation of porosity accordingly. When the produced samples were examined, an increase was observed in the number of porosities.

According to Table 3, it is seen that the tensile strength is lowest in test material 9, and best in test material number 11. Microstructure analysis was made for these two test pieces and the images in figure 11 were obtained with using metal microscope. The purpose of microstructural analysis is to see whether there is a microstructural difference in the samples with the best and worst results.



a)



b)

Figure 11. Microstructure of test specimen 11 (a), microstructure of test specimen 9 (b) (11 numaralı test numunesi mikroyapısı (a), 9 numaralı test numunesi mikroyapısı (b))

When the microstructure results are examined, it is thought that the regions marked with circular shapes are porosities. This situation also explains the lower strength of sample number 9 (Figure 11-b). These differences between microstructures affect the mechanical properties of materials. Especially the gas porosities in the cast materials produced negatively affect the strength of the material.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the values of the hardness and tensile tests of the test specimens that were molded by using Aluminum (AlSi₁₂Cu) EN AC 47000 alloy according to the determined injection parameters were statistically analyzed with using full factorial design method. In addition, the effect of the injection parameters on the mechanical properties of the molding material was tried to be understood according to the results. The results obtained with the full factorial method are generally as follows:

- In Pareto charts, it is observed that the temperature variable is the parameter that most affects both the tensile strength and hardness value of the produced material. In the results of the factorial analysis, the highest F value was in the temperature variable.
- It was observed that the increase in molten metal temperature increased the hardness value and the highest hardness value was obtained as 85,05 HB (Table 3) in sample number 25 (temperature 750 °C, injection velocity 1,3 m/s, mold opening time 10 s).
- The factorial analysis for the hardness test results obtained revealed that the highest hardness values were obtained when the molten metal temperature was 725 °C, the injection velocity was 4 m/s, and the mold opening time was 10 s.
- It has been observed that good results are obtained for tensile strength values when the temperature value increases and the mold opening time is 12 s, and the highest tensile strength value is 264 MPa (Table 3) in sample 11 (temperature 725 °C, injection velocity 4 m/s, mold opening time 12 s).
- The factorial analysis for the obtained tensile test results, when the molten metal temperature of 725 °C, the injection velocity 2,6 m/s, the mold opening time was 15 s, the highest tensile strength values were obtained.
- When the 3D interaction graphs in Figures 8 and 12 are examined, it is observed that the results obtained are similar to the main effects graphs.

Moreover, some recommendations that helps to someone who can work in this subject are given in following:

- Heat treatments can be performed on molded samples.
- Machinability tests can also be performed on molded samples.
- Microstructures of the samples can be examined in detail.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

I would like to thank My advisor Assoc. Dr. Yunus KAYIR, my family and colleagues who supported me during my intensive studies, and Onur TARHAN who did not spare his help during my experimental studies.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Emre AKKAYA: He conducted the experiments, determined design of experiment, analyzed the results and performed the writing process.

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

Yunus KAYIR: He conducted the experiments and checked the analysis of the test results.

Deneyleri yapmış ve deney sonuçlarının analizlerini kontrol etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ç. Çağan, M. Uğurlu and B. Buldum, Aluminum and Its Alloys Applications in Military Vehicles., in II. International Defense Industry Symposium, Kırıkkale, 2017.
- [2] X. Dong, . H. Yang, . X. Zhu and S. Ji, "High Strength and Ductility Aluminium Alloy Processed by High Pressure Die Casting," Journal of Alloys and Compounds, vol. 773, pp. 86-96, 2019.
- [3] O. Serçe and M. Kuru, "Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Enjeksiyon Parametrelerine Bağlı Olarak Döküm Simülasyonu," Cumhuriyet Science Journal, vol. 36, no. 5, pp. 10-23, 2015.
- [4] V. Toptaş, "Bir Alüminyum Alaşımı ile Basınçlı Döküm Yöntemi Kullanılarak Tabanca Gövdesi Üretimi," Istanbul Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis, 2014.
- [5] F. Mert, A. Özdemir and Ç. Karataş, "Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi," Journal of Polytechnic, vol. 13, no. 3, pp. 165-176, 2010.
- [6] Y. B. Süslü, M. S. Acar, O. Özcan , M. Mutlu and Ö. Keleş, "Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm İle Üretilen Ürün Kalitesine AlTi5B1 ve AlB3 Ön Alaşımının Etkisi," in TÜDÖKSAD 2nd Casting Conference, 2019.
- [7] M. A. Haque, B. K. Jena and D. K. Mohanta, "Optimization of Process Parameters In Cold Chamber Pressure Die Casting Using DOE," vol. 4, 2017.
- [8] M. Mihailescu, A. Negrea, M. Ciopec, P. Negrea, N. Duteanu, I. Grozav, P. Svera, V. Cosmin, A. Barbulescu and C. S. Dumitriu, "Full Factorial Design Gold Recovery from Industrial Solutions," Toxics, vol. 9, no. 5, 2021.
- [9] A. Spanelis and A. D. Walker, "A Multi-Objective Factorial Design Methodology for Aerodynamic Off-Takes and Ducts," Aerospace, vol. 9, no. 3, 2022.
- [10] I. A. Mohammed, M. T. Bankole, A. S. Abdulkareem, S. S. Ochigbo, A. S. Afolabi and O. K. Abubakre, "Full factorial design approach to carbon nanotubes synthesis by CVD method in argon environment," South African Journal of Chemical Engineering, vol. 24, pp. 17-42, 2017.
- [11] G. Akman and C. Özkan, "Sac İmalatında Karşılaşılan Yapışma Probleminin Deney Tasarımı İle Çözümü," Doğuş University Journal, pp. 187-199, 2011.
- [12] M. Korkmaz, C. Özmetin, E. Özmetin, E. Çalgan and Y. Süzen, "Boron Removal by Aluminum Modified Pumice and Aluminum Hydroxide from Boron Mine Wastewater-Full Factorial Experimental Design," Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 1-13, 2021.
- [13] T. Wang, J. Huang, H. Fu, K. Yu and S. Yao, "Influence of Process Parameters on Filling and Feeding Capacity during High Pressure Die-Casting Process," Applied Sciences, vol. 12, no. 9, 2022.
- [14] B. Gökçe and S. Taşgetiren, "Kalite İçin Deney Tasarımı", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 6, no. 1, pp. 71-83, 2009.
- [15] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, vol. 7th, New York: John Wiley & Sons, 2008.

Investigation of the Effect of Filling Ratio on Mechanical Properties of Pumice Filled Epoxy-Based Composites

Ertan KÖSEDAĞ^{1*} 

¹Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Van, Turkey

Article Info

Research article
Received: 09/04/2023
Revision: 27/05/2023
Accepted: 29/05/2023

Keywords

Epoxy
Pumice
Filled Composites
Compression Test

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/04/2023
Düzeltilme: 27/05/2023
Kabul: 29/05/2023

Anahtar Kelimeler

Epoksi
Pomza
Dolgu Kompozit
Basma Testi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, unfilled and 10%, 20%, 30% pumice filled epoxy-based composites were produced by vacuum method and the effect of filling ratio on the mechanical properties of the composites was investigated. / Bu çalışmada, dolgunsuz ve % 10, 20, 30 pomza dolgulu epoksi bazlı kompozitler vakum metodu ile üretilmiş ve dolgu oranının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Figure A: Schematic representation of production and testing phases. / Şekil A: Üretim ve test aşamalarının şematik gösterimi.

Highlights (Önemli noktalar)

- The powders in the composites were dispersed with an ultrasonic mixer and air evacuated by vacuuming. / Kompozitlerdeki tozlar ultrasonik karıştırıcı ile dağıtılmış ve vakumlama ile hava tahliyesi yapılmıştır.
- The effect of filling ratio on mechanical properties was investigated with 3 different ratios of filled composite and control samples. / 3 farklı oranda dolgulu kompozit ve kontrol numunesi ile dolgu oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Observations were made with an optical microscope to observe the fill distribution. / Dolgu dağılımı gözlemi için optik mikroskopla gözlemler yapılmıştır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to determine the change in the mechanical properties of epoxy-based composites as a filling material with pumice powder. / Bu çalışmanın amacı pomza tozunun dolgu malzemesi olarak epoksi bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimi tespit etmektir.)

Originality (Özgünlük): The original aspect of the study is the use of pumice powder as a filled material. / Çalışmanın özgün yanı dolgu malzemesi olarak pomza tozunun kullanılmasıdır.

Results (Bulgular): Optimum mechanical values were found in 20% pumice filled composite. The maximum stress value of the 20% filled composite material was found to be 30.6 MPa and the equivalent unit strain at this point was 0.049% according to the mechanical test findings. / Optimum mekanik değerler %20 pomza dolgulu kompozitte bulunmuştur. %20 dolgulu kompozit malzemenin maksimum gerilme değeri 30,6 MPa ve bu noktadaki eşdeğer birim gerinim mekanik test bulgularına göre %0,049 olarak bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): As a result, it has been determined that the pumice filling significantly affects the mechanical properties of the epoxy-based filled composite and this change is directly related to the filling ratio. / Sonuç olarak pomza dolgusunun epoksi bazlı dolgulu kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği ve bu değişimin dolgu oranı ile doğrudan bağlantılı olduğu tespit edilmiştir.



Investigation of the Effect of Filling Ratio on Mechanical Properties of Pumice Filled Epoxy-Based Composites

Ertan KÖSEDAĞ^{1*}

¹Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Van, Turkey

Article Info

Research article
Received: 09/04/2023
Revision: 27/05/2023
Accepted: 29/05/2023

Keywords

Epoxy
Pumice
Filled Composites
Compression Test

Abstract

This study attempted to filled epoxy, a widely used industrial material, with pumice, a cheap volcanic rock, in order to form a composite material. The objective was to evaluate the worth of the pumice and improve the mechanical properties of the epoxy. Composite samples with no filler, 10%, 20%, and 30% filler were produced. An ultrasonic mixer during manufacture made sure the powder was dispersed properly, and vacuuming stopped air pockets from accumulating in the composite. The mechanical characteristics of the composites were evaluated by compression testing, and the post-production distribution of the powder was observed using optical microscope pictures. Finally, XRF analysis was used to establish the composition of the pumice powder. The outcomes demonstrated that adding filler greatly enhanced the maximum stress and unit strain values of the composites. Optimum mechanical values were found in 20% pumice filled composite. The maximum stress value of the composite material with 20% filler was found to be 30.6 MPa, and the equivalent unit strain at this point was 0.049%, according to the mechanical test findings.

Pomza Dolgulu Epoksi Esaslı Kompozitlerin Dolgu Oranının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/04/2023
Düzeltilme: 27/05/2023
Kabul: 29/05/2023

Anahtar Kelimeler

Epoksi
Pomza
Dolgulu Kompozit
Basma Testi

Öz

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan ve endüstriyel bir malzeme olan epoksi, ucuz volkanik bir kayalık olan pomza ile doldurularak kompozit bir malzeme elde edilmeye çalışılmıştır. Amaç, pomzayı katma değeri yüksek olarak değerlendirmek ve epoksinin mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Dolgusuz, %10, %20 ve %30 dolgulu kompozit numuneler üretilmiştir. Üretim sırasında bir ultrasonik karıştırıcı kullanılarak tozun homojen bir şekilde dağılması sağlanmış ve vakumlama ile hava ceplerinin kompozitte birikmesi önlenmiştir. Kompozitlerin mekanik özellikleri basma testi ile tespit edilmiş ve tozun üretim sonrası dağılımı optik mikroskop resimleri kullanılarak gözlemlenmiştir. Son olarak, pomza tozunun bileşimini belirlemek için XRF analizi kullanılmıştır. Sonuçlar, dolgu maddesi eklenmesinin kompozitlerin maksimum gerilim ve gerinim değerlerini büyük ölçüde artırdığını göstermiştir. Optimum mekanik değerler %20 pomza dolgulu kompozitte bulunmuştur. %20 dolgulu kompozit malzemenin maksimum gerilme değeri 30,6 MPa ve bu noktadaki eşdeğer birim gerinim mekanik test bulgularına göre %0,049 olarak bulunmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The mechanical properties of composites are vital in determining their suitability to suit diverse applications [1]. Epoxy-based composites are known for their excellent mechanical properties, including high stiffness, strength, and toughness. In addition, epoxy-matrix composites exhibit low thermal conductivity and high temperature resistance, which make them widely used in various industries such as automotive, aviation,

construction, marine, and other [2], [3]. Furthermore, epoxy-matrix composites are more durable and have longer lifetimes compared to other polymer-based materials. Therefore, it has become a preferred material for product design and engineering applications in many industries. However, the addition of fillers such as graphene, clay, carbon nanotube, SiC, SiO₂, B₄C pumice etc. can further enhance these properties while maintaining the low weight and ease of processing of the epoxy matrix [4]. Particle fillers are a widely

used type of filler in composite materials. They could significantly influence the mechanical, thermal, surface, and fire resistance properties of composites. When added to a matrix material, particle fillers can induce changes in the properties of the matrix. Particle fillers offer numerous advantages, including low cost, high flexibility in comparison to high-density filler materials, high surface area, and low density. These fillers can be found in a variety of sizes and shapes and can be made from different materials. The use of particle fillers in composite materials is particularly preferred for their ability to decrease material costs, increase material properties, decrease weight, and provide performance characteristics that meet specific requirements.

Pumice is an attractive filler material due to its unique properties. It is a natural volcanic rock that is lightweight, porous, and abundant. Pumice is also low in cost, making it an appealing alternative to other fillers that may be more expensive. Pumice is a type of volcanic rock that is typically formed from the explosion of gas bubbles on the surface of lava [5]. It is a lightweight and porous material that can float on water. Pumice can be dark or light in color and, despite its lightweight and porous structure, it is quite durable. It is used in various fields such as construction, cosmetics and gardening [6]. The composition of pumice can vary depending on its source, but in general, it is primarily made up of volcanic glass with high amounts of silica (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), and other trace elements. It also contains numerous gas pockets or vesicles, which give it its porous and lightweight nature. To improve the mechanical properties of epoxy-based composites, low-density particle fillers, such as pumice, can be utilized. By providing a high surface area, particle fillers like pumice can improve the material properties and provide in the production of materials that meet specific performance requirements [7]. Apart from this, the fact that pumice is very cheap compared to other filling materials is also a remarkable feature. Below are some studies with pumice and epoxy, which were determined as a result of the literature review.

Koyuncu [8] explored the effect of adding pumice powder to corn shell reinforced with epoxy composites. The composites were prepared using different weight percentages of pumice powder through a hand lay-up technique, and their mechanical properties, including tensile strength, flexural strength, and water absorption, were evaluated through mechanical tests. The findings showed that the composites with 20% and 15% pumice powder have the best mechanical

characteristics. Moreover, the addition of pumice powder has been found to improve the mechanical properties of the composites. The 20% and 15% pumice powder composites showed tensile and flexural strengths of 11.745 MPa and 11.250 MPa, respectively. Additionally, the 25% pumice powder composite has been observed to display superior resistance to water absorption compared to the other composites. Purohit at al., [9] conducted experiments with fly ash, which possesses a chemical composition akin to that of pumice. They explored the potential benefits of incorporating fillers such as glass fiber and fly ash into polymer composites for various applications. The main aim of their research was to investigate the impact of fly ash powder additions to the epoxy matrix on the properties of polymer matrix composites. Using the hand lay-up method, they produced composite materials with varying mass percent of fly ash particles. The composites were subsequently subjected to microstructural, tensile, impact, and flexural strength tests to determine how the introduction of fly ash affected their properties. In a study conducted by Koyuncu et al., [10] the aim was to investigate the effect of adding pumice powder (20wt%) on the elongation and water absorption at break properties of epoxy-based composites reinforced with three different types of walnut husk particles. The composites were produced using the hand lay-up method. The authors found that as the filler content increased, the water absorption of the composites decreased. The study concluded that adding pumice powder was effective in improving the performance of the walnut husk/epoxy composites due to the modification of the hydrophilic characteristics of the walnut husk particles. However, it was also discovered that the incorporation of pumice powder led to a significant decrease in the elongation at break of the composites. Fleischer at al., [11] introduced a method for manufacturing epoxy based composite panels by utilizing pumice stones and an epoxy binder in one of their studies. They evaluated the cost-effective and lightweight structure by conducting mechanical tests and explored its potential in energy absorption applications.

As it is known, epoxy-based composites are used in many areas in practice. However, a disadvantage of epoxy-based composites that limits the application areas is that they have insufficient ductility and therefore have a brittle structure. Many studies have been carried out to address this deficiency. One of the solutions for this area is powder filling of epoxy-based composites. However, some powders have a positive effect, some have a negative effect, and some may have a different effect according to the

filling ratio. In this study, the effect of pumice filler and filler ratio on the mechanical strength and especially ductility of the epoxy-based composite was investigated. When using pumice as a filler material in epoxy-based composites, it is crucial to consider the filling ratio. The filling ratio determines the amount of pumice that is added to the epoxy matrix, and it can significantly impact the resulting composite's mechanical properties. Understanding how the filling ratio affects the mechanical properties of the epoxy-based composite is crucial for the intended application. For instance, a composite material designed for structural applications may require a high filling ratio to achieve the desired strength and hardness, whereas a material designed for impact resistance may require a lower filling ratio to enhance toughness and flexibility. To address these issues, this study investigates the influence of the filling ratio on the mechanical properties of pumice-filled epoxy-based composites. Overall, this study has significant implications for the development of high-performance polymer based composite materials that are cost-effective and environmentally friendly. The investigation of the effect of filling ratio on the mechanical properties of pumice-filled epoxy-matrix composites can contribute to the advancement of materials science and engineering and the development of innovative solutions for a range of applications.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

In this study, the microstructure characterization and compressive mechanical strength of pumice-reinforced epoxy-matrix composite materials were determined using the following methods.

The production of pumice-reinforced epoxy matrix composite materials was the first step of this study, which is visualized schematically in Figure 1. Hexon LR160 resin and MGS LH160 hardener were used. Acidic pumice was washed, dried, ground, separated by sieves and used. XRF analysis of the pumice we used was performed and the results are listed in Table 1. The dimensions of the pumice powder used are approximately 45 microns. Pumice powder was mixed with epoxy resin in weight percentages of 10%, 20%, and 30% during the production process. The mixing process was carried

out for 30 minutes using an ultrasonic mixer, and then left under vacuum for 10 minutes to ensure homogeneity. The mixture was then poured into cylindrical molds and cured at room temperature for 24 hours. This process was repeated for each pumice-reinforced epoxy matrix composite material. In addition, an unfilled epoxy specimen was produced as a control specimen.

The use of ultrasonic mixers in the production of composites aimed to improve the quality and properties of the composite materials. Ultrasonic mixers use high-frequency ultrasonic vibrations to mix the materials and provide a homogeneous distribution. This is a crucial feature because uneven distribution of powders can lead to irregularities and differences in the properties of the composite materials. By providing a homogeneous distribution of the powder, ultrasonic mixers lead to improve important properties of the composite material, such as strength, and other properties. Additionally, ultrasonic mixers are more efficient and mix materials in a shorter time, which helps to reduce the production time.

Secondly, the compressive mechanical strengths of the composite specimen were determined in accordance with the ASTM D695 standard. To this end, the specimen geometry and dimensions are depicted in Figure 2. The compression tests were conducted using a universal testing machine at a speed of 2 mm/min. For each specimen, three repetitions were carried out, and the average were calculated. The ASTM D695 standard is generally used to test the compressive properties of hard polymers. In accordance with this standard, the cylindrical sample dimensions are commonly determined as 12.5 mm in diameter and 25 mm in height, which enables the samples to be tested in accordance with appropriate testing equipment and standards. It is substantial to prepare and test the specimen properly in order to obtain accurate results. Therefore, post-production adjustments in the sample dimensions were made using a wet cylindrical cutting method.



Figure 1. Schematic representation of production and testing phases (Üretim ve test aşamalarının şematik gösterimi)

Finally, an optic microscope (OM) was employed to investigate the internal structures of the composite samples produced. The resulting images were then analyzed to evaluate the compatibility between the

pumice powder and the epoxy matrix, as well as the impact of the filling ratio on the fracture mechanism and potential defects.

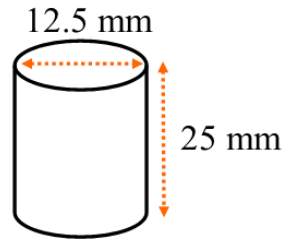


Figure 2. Filled specimen geometry and dimensions (Dolgu lu kompozit numune geometrisi ve boyutları)

Table 1. XRF analysis results of ground and separated pumice powder (Öğütülmüş ve yabancı maddelerden arındırılmış pomza tozunun XRF analiz sonuçları)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
74.43%	12.83%	1.83%	1.56%	4.37%	4.37%

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In this study, the mechanical properties of unfilled, 10%, 20%, 30% pumice reinforced epoxy-based composites were investigated by compression tests. Compression tests of epoxy-based composites reinforced with pumice reinforcement at different rates were carried out. The test results provide detailed information on the mechanical strength of each composite. In this section, the analysis of the results obtained for each pumice reinforcement ratio presented and the results discussed.

The stress-strain curves for each composite are depicted in Figure 3. The results showed that the unfilled composite material's fracture point was 24.33 MPa. The amount of unit deformation during the peak stress was 0.032%. After the maximum load, the unfilled material exhibited no strength and abruptly fell. Based on these observations during the test, it was determined that the sample was extremely brittle. The graph shown in Figure 2 shows that during the compression test, the composite material with 10% pumice filler showed a maximum stress value of 29.7 MPa and a corresponding unit strain of 0.05%. According to the findings, the maximum stress value increased when compared to the unfilled composite. In

particular, the unit strain increased by 56.2 % while the maximum stress value increased by 22.1 % as compared to the unfilled composite. These results indicate that the maximum stress value and unit strain significantly increased after 10% pumice was added to the epoxy-based composite. These results are impressive and show the potential advantages of using pumice in composite materials.

The maximum stress value of the composite material with 20% filler was found to be 30.6 MPa, and the equivalent unit strain at this point was 0.049%, according to the mechanical test findings. The maximum stress value increased when compared to the unfilled and 10% filled composites, but only when compared to the unfilled composite did the increase become statistically significant. Furthermore, when compared to the 10% filled composite, it was discovered that the increase in the maximum stress value was quite minimal. Compared to the unfilled composite, the unit strain values increased, but when compared to the 10% filled composite, they essentially stayed the same. The maximum stress value for the composite material with 30% pumice filler was determined to be 30.4 MPa, and the equivalent unit strain at this point was 0.046% when the values of the composite material with this filler were analyzed. The results obtained imply that the mechanical properties of the epoxy-based composite material were greatly enhanced by the inclusion of pumice filler. The fact that both the maximum stress value and unit strain increased as a result of this makes it more notable. The lack of a discernible variation in the mechanical characteristics of the composites with 10%, 20%, and 30% fillers implies that a 10% filler ratio is adequate to get the best results. Because to the micro porous nature of pumice and the vacuum-assisted impregnation of epoxy during manufacture, the mechanical properties have probably improved.

In Figure 4, optical microscope images of the unreinforced and 10%, 20%, and 30% filled composite samples are sequentially presented. As can be seen from the images, the distribution has been nearly homogeneous. Additionally, it was found that the volcanic rock, pumice, has a sharp-edged structure and its geometry allows for a good interfacial bond with the epoxy matrix.

Figure 5 shows the samples' visual representations both before and after testing. It is clear from these figure that the filled samples behave more ductile and fracture and shatter in a less brittle manner than the unreinforced sample does. Particularly noteworthy is the fracture of the 20% filled composite, which displays ductile material behavior at a 45-degree angle. The unfilled sample is completely dispersed under compression load, the fracture type changes as the filling ratio increases. While it shattered by controlled breaking in 30% and 10% reinforced samples, no fragmentation was observed in the 20% filled sample. In addition, while the unreinforced sample has a transparent appearance, it is seen that there is a darkening in the sample colors as the filling ratio increases. This color change is homogeneous throughout the sample. This shows that the mixture is close to homogeneous.

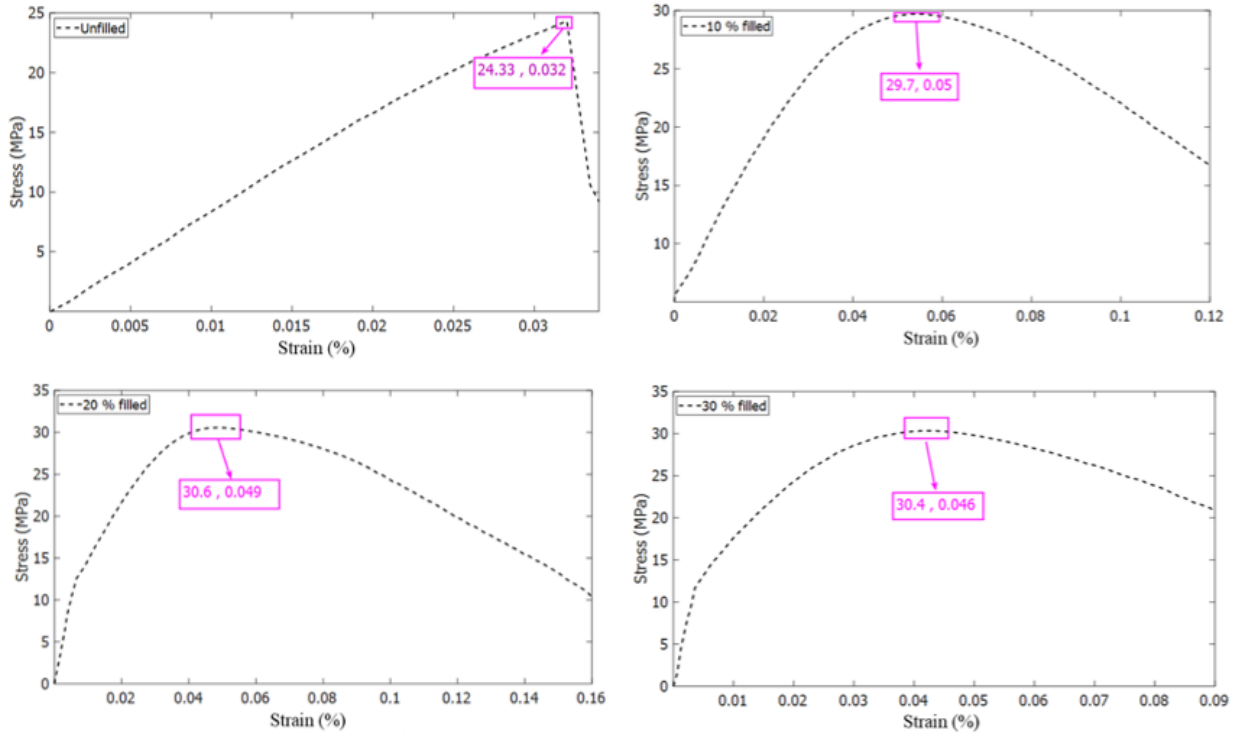


Figure 3. Compression test results of unreinforced, 10%, 20%, 30% filled pumice/epoxy composites (Takviyesiz, %10, %20, %30 dolgulu pomza/epoksi kompozitlerin basma testi sonuçları)

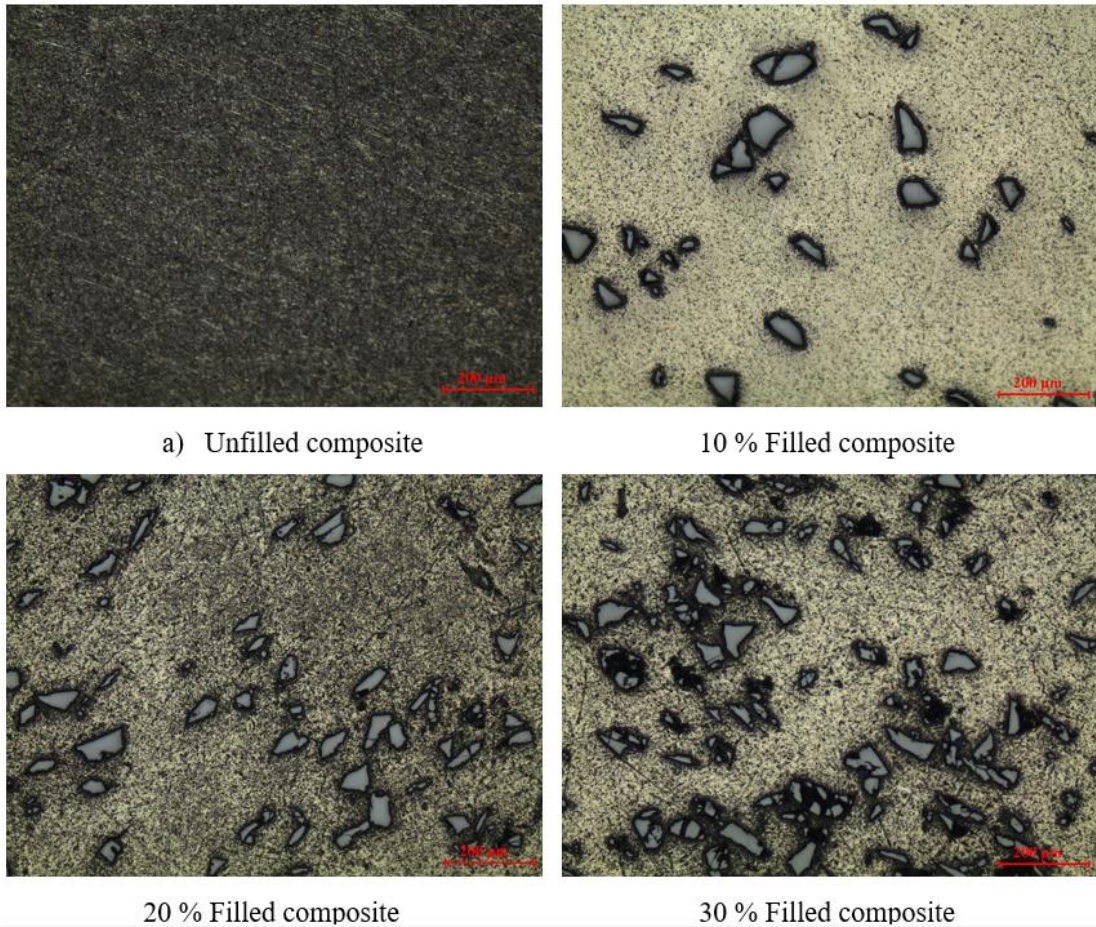


Figure 4. Optical microscope images of unreinforced, 10%, 20%, 30% filled pumice/epoxy composites (Takviyesiz, %10, %20, %30 dolgulu pomza/epoksi kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri)

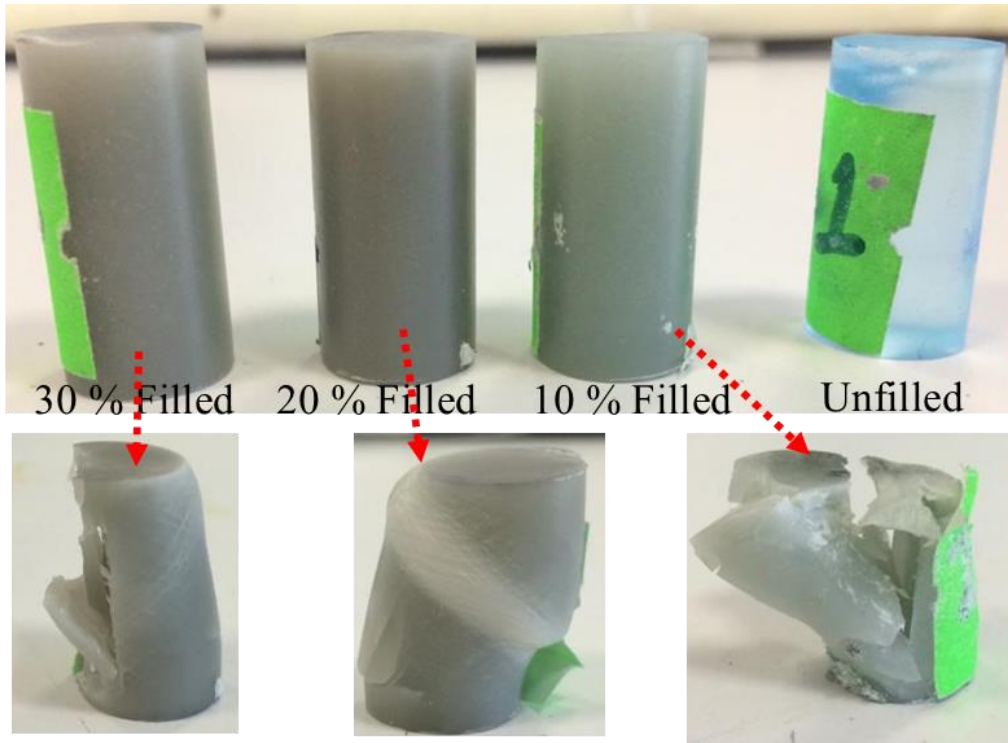


Figure 5. The images before and after testing of filled composites (Dolgu kompozitlerin test edilmesinden önceki ve sonraki görüntüler)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study sought to characterize the pumice-reinforced epoxy-matrix composite materials' microstructure and compressive mechanical strength. In-depth information about the creation of composite materials was provided, and it was demonstrated that using ultrasonic mixers enhanced their quality and properties. The ASTM D695 standard was used to determine the compressive mechanical strengths of the composite specimens, and the resulting stress-strain curves for each composite were examined. In addition, XRF analysis was performed on the cleaned, dried, ground and sieved pumice powders for the determination of the pumice mineral content used in composite materials and it was determined that it mainly contained SiO_2 . The results of the compression tests demonstrated that the maximum stress value and unit strain of the composites were greatly increased by the addition of pumice. When 10% pumice was added to the composite, the unit strain increased by 56.2% and the maximum stress value by 22.1%. The maximum stress value and unit strain were both improved by the inclusion of 20% and 30% pumice, although these improvements were not statistically different from those of the 10% filled composite. The distribution of pumice was virtually uniform, and the optical microscope

images showed that it had a strong interfacial bond with the epoxy matrix. Additionally, compared to the empty sample, the filled samples had a more ductile behavior. These results imply that pumice may be a useful and affordable filler for enhancing the mechanical characteristics of composite 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)

Ertan KÖSEDAĞ: He 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] E. Kosedag and R. Ekici, “Low-velocity and ballistic impact resistances of particle reinforced metal–matrix composites: An experimental study,” *J. Compos. Mater.*, vol. 56, no. 7, pp. 991–1002, Mar. 2022, doi: 10.1177/00219983211068101.
- [2] N. Saba and M. Jawaid, “3 - Epoxy resin based hybrid polymer composites,” in *Hybrid Polymer Composite Materials*, V. K. Thakur, M. K. Thakur, and A. Pappu, Eds. Woodhead Publishing, 2017, pp. 57–82. doi: 10.1016/B978-0-08-100787-7.00003-2.
- [3] E. Kosedag, “Effect of artificial aging on 3-point bending behavior of glass fiber/epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, p. 07316844221146287, Dec. 2022, doi: 10.1177/07316844221146287.
- [4] E. Kosedag, U. Caliskan, and R. Ekici, “The effect of artificial aging on the impact behavior of SiC nanoparticle-glass fiber-reinforced polymer matrix composites,” *Polym. Compos.*, vol. 43, no. 2, pp. 964–976, 2022, doi: 10.1002/pc.26426.
- [5] R. Ekici and E. Kosedag, “Comparison of the low-velocity impact behaviors of SiC and pumice particle-reinforced metal matrix composites,” *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5, no. 10, pp. 101–105, 2017.
- [6] Z. Aygun and M. Aygun, “Spectroscopic analysis of Ahlat stone (ignimbrite) and pumice formed by volcanic activity,” *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 166, pp. 73–78, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.saa.2016.05.018.
- [7] K. Sever, M. Atagür, M. Tunçalp, L. Altay, Y. Seki, and M. Sarikanat, “The effect of pumice powder on mechanical and thermal properties of polypropylene,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 32, no. 8, pp. 1092–1106, Aug. 2019, doi: 10.1177/0892705718785692.
- [8] M. Koyuncu, “Evaluation of Mechanical and Water Absorption Behaviours of Corn Shell/Pumice Reinforced Epoxy Composites,” *Eur. J. Sci. Technol.*, Jan. 2022, doi: 10.31590/ejosat.1042310.
- [9] R. Purohit, P. Sahu, R. S. Rana, V. Parashar, and S. Sharma, “Analysis of Mechanical Properties of Fiber Glass-Epoxy-Fly Ash Composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 3102–3109, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.193.
- [11] Menderes Koyuncu and Baran Erkek, “Effects of Particle Size, Pumice Powder Filling on The Water Absorption Behavior, and Elongation at Break Properties of Walnut Husk Particles Reinforced Epoxy Composite,” *Eur. J. Res. Dev.*, vol. 2, no. 2, pp. 182–189, Jun. 2022, doi: 10.56038/ejrnd.v2i2.51.
- [12] C. A. Fleischer and M. Zupan, “Mechanical Performance of Pumice-reinforced Epoxy Composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 23, pp. 2679–2696, May 2010, doi: 10.1177/0021998310369575.

Scheduling of Air Traffic Controllers in Turkey: A Two-Step Solution Approach Using Goal Programming

Zekeriya KAPLAN¹  Büşra TUTUMLU²  İlknur TÜKENMEZ^{3*} 

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrolü Bölümü, 26555, Mutallıp/ESKİŞEHİR

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 43020, Merkez/KÜTAHYA

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 61080, Merkez/TRABZON

Article Info

Research article

Received: 02/01/2023

Revision: 20/02/2023

Accepted: 22/02/2023

Keywords

Air Traffic Controller
Personel Scheduling
Integer Programming
Goal Programming
Controller Workload
Balancing
Shift Scheduling

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 02/01/2023

Düzeltilme: 20/02/2023

Kabul: 22/02/2023

Anahtar Kelimeler

Hava Trafik Kontrolörü
Personel Çözümleme
Tamsayılı Programlama
Hedef Programlama
Kontrolör İş Yükü
Dengeleme
Vardiya Çözümleme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the scheduling problem of air traffic controllers (ATCo) providing field control services in Turkey's handled by considering traffic density and weather conditions. With the developed two stage mathematical model, it is aimed to balance the workloads of the employees. / Bu çalışmada Türkiye'deki Hava trafik kontrolörlerinin iş çözümü problemi trafik yoğunluğu ve hava durumu dahil edilmiştir. Geliştirilen 2 aşamalı matematiksel model ile çalışanların iş yükleri arasındaki dengeyi sağlamak amaçlanmıştır.

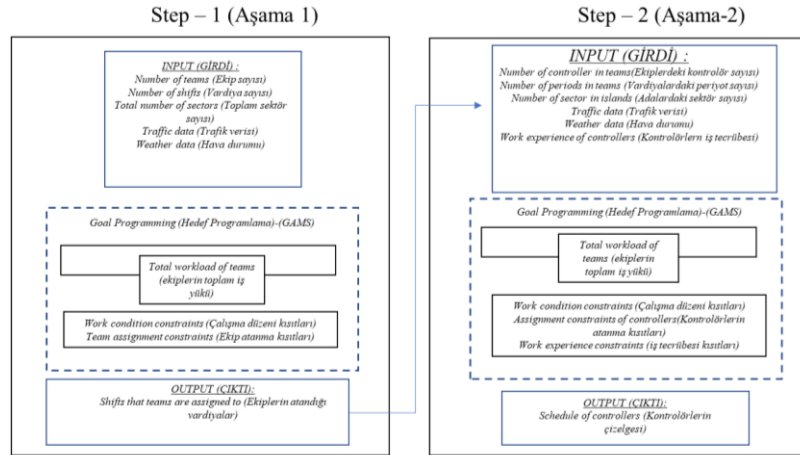


Figure A: Two step of ATCo scheduling problem / Şekil A: ATCo çözümleme probleminin iki aşaması

Highlights (Önemli noktalar)

- Air Traffic Controller / Hava Trafik Kontrolü
- Controller Workload Balancing / Kontrolör İş Yükü Dengeleme
- Shift Scheduling / İş Çözümleme

Aim (Amaç): The purpose is to balance the workloads of the controller according to traffic density and weather conditions. / Bu çalışmanın amacı kontrolörlerin iş yüklerini trafik yoğunluğu ve hava koşulları dikkate alınarak dengelemektir.

Originality (Özgünlük): Workload balancing of ATCo in Turkey by considering the traffic density and seasonal conditions, has not been discussed in the literature before. / Trafik yoğunluğu ve mevsimsel koşullar dikkate alınarak Türkiye hava kontrolörlerinin iş yükünü dengeleme problemi daha önce literatürde ele alınmamıştır.

Results (Bulgular): With the proposed mathematical model, at the first stage, shift assignments have been made to balance the total workload of the teams consisting of a certain number of people. In the second stage, the controllers have been scheduled to balance the workloads of the teams in each shift. / Önerilen matematiksel model ile ilk aşamada belirli sayıda kişiden oluşan ekiplerin toplam iş yüklerini dengeleyecek şekilde vardiya atamaları yapılmıştır. İkinci aşamada ise her bir vardiyadaki ekiplerin kendi içerisinde iş yüklerini dengeleyecek şekilde kontrolörlerin çözümlemesi yapılmıştır.

Conclusion (Sonuç): In this study, by balancing the workloads of the controllers, it was ensured that the working conditions were more fair and improved. / Bu çalışmada kontrolörlerin iş yüklerinin dengelemesi ile çalışma koşullarının daha adil olması ve iyileştirilmesi sağlanmıştır.



Türkiye'deki Hava Trafik Kontrolörlerinin Çizelgelenmesi: Hedef Programlama Kullanarak İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı

Zekeriya KAPLAN¹ Büşra TUTUMLU² İlknur TÜKENMEZ^{3*}

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrolü Bölümü, 26555, Mutallıp/ESKİŞEHİR

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 43020, Merkez/KÜTAHYA

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 61080, Merkez/TRABZON

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/01/2023
Düzeltilme: 20/02/2023
Kabul: 22/02/2023

Anahtar Kelimeler

Hava Trafik Kontrolörü
Personel Çizelgeleme
Tamsayılı Programlama
Hedef Programlama
Kontrolör İş Yükü
Dengelemesi
Vardiya Çizelgeleme

Öz

Bu çalışmada Türkiye'de saha kontrol hizmeti veren hava trafik kontrolörlerinin (ATCo) çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Kontrolörler belirli bir zaman diliminde sınırlı sayıda uçak kontrol edebileceği için hava sahaları birden fazla sektöre ayrılmaktadır. Yol safhasındaki uçuşlar için verilen saha kontrol hizmeti hem yerel uçuşları hem de ülke sınırları içerisindeki herhangi bir havalimanına iniş-kalkış yapmayan transit uçuşları kapsamaktadır. Bu sektörlerdeki trafik yoğunluğu saatlik dilimlere, gece-gündüz saatlerine ve mevsimlere göre değişkenlik göstermektedir. Trafik yoğunluğu ile doğru orantılı olarak da kontrolörlerin iş yükü artmaktadır. Bunun yanı sıra mevsimsel farklılıklar ve hava koşulları iş yükünü etkileyen faktörlerdir. Bu faktörler de doğrudan kontrolör iş yükünü etkilemektedir. Çalışmada sektörlerdeki tahmini trafik talebi ve hava koşulları dikkate alınarak kontrolörlerin iş yükü dağılımını dengelemek amacıyla iki aşamalı matematiksel model önerilmiştir. İlk aşamada farklı kontrolör ekiplerinin toplam iş yüklerini dengeleyecek şekilde 10 günlük vardiya atamaları yapılmıştır. İkinci aşamada ise personelin iş yükünü dengeleyecek şekilde her bir vardiyadaki her bir ekip bünyesindeki kontrolörlerin çizelgelemesi yapılmıştır. Kontrolörlerin çalışma saatleri, dinlenme saatleri gibi çalışma koşullarının yanında tecrübeli ve tecrübesiz kontrolör ayrımı da dikkate alınmıştır.

Scheduling of Air Traffic Controllers in Turkey: A Two-Step Solution Approach Using Goal Programming

Article Info

Research article
Received: 02/01/2023
Revision: 20/02/2023
Accepted: 22/02/2023

Keywords

Air Traffic Controller
Personel Scheduling
Integer Programming
Goal Programming
Controller Workload
Balancing
Shift Scheduling

Abstract

In this study, the scheduling problem of air traffic controllers (ATCo) providing area control services in Turkey is discussed. Airspace is divided into multiple sectors, as controllers can control a limited number of aircraft in a given time period. The area control service provided for the flights at the en-route phase includes both of the transit and domestic flights. The traffic density in these sectors varies according to hourly zones, day-night hours and seasons. As the traffic density increases, the workload also increases. In addition, seasonal differences and weather conditions are factors that affect the workload. In the study, a two-stage mathematical model is proposed in order to balance the workload distribution of the controllers, considering the estimated traffic demand and weather conditions in the sectors. In the first stage, shift assignments were made to balance the total workload of the teams consisting of a certain number of people in a ten-day period. In the second stage, the controllers were scheduled to balance the workloads of the teams in each shift. In addition to the working conditions of the controllers such as work and rest hours, the difference of experienced and inexperienced ATCo is also considered.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1990 ile 2019 yılları arasında hava yolculuğuna olan talep dünya genelinde yıllık ortalama %3,5 artış

göstermiştir [1]. Bu talebin artışı, uçuş sayısında da artışa neden olmuştur, bu da hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün artması anlamına gelir. Genel olarak hem fizyolojik hem de psikolojik

etkisi olan iş yükü, yapılacak görevlerin gerektirdiği nesnel çabalar ve bu çabalara ilişkin kişinin öznel algısı olarak tanımlanmaktadır [2]. Repetti, kontrolörlerin iş arkadaşları ile sosyal etkileşimi, günlük ruh hali ve sağlık şikayetleri ile ilgili yaptığı çalışmada bir kontrolörün iş yükünü havalimanındaki trafik oranı olarak tanımlamıştır [3]. Ancak, uçuş sayısının yanında uçuş türleri ve hava koşullarındaki değişimlere bağlı olarak iş yüklerinde artış olabilir. Kontrolörlerin tecrübelerine göre farklı etkiye sahip olan bu faktörleri de hesaba katarak çalışmamızda iş yükünü; belirli bir zaman diliminde belirli trafik ve hava koşullarında kendi sorumluluklarındaki hava sahasında kontrol ettikleri toplam uçak sayısı olarak tanımlamaktayız.

Hava trafik kontrol hizmeti, uçaklar arasındaki ve uçaklarla engeller arasındaki çakışmaları önleyerek emniyetli, hızlı ve düzenli bir hava trafik akışı sağlamak ve sürdürmektir. Hava trafik kontrolörleri, küresel hava trafik sisteminde bu hizmeti sağlamak için eğitilen kişilerdir [4]. Hava trafik kontrol hizmeti; saha kontrol hizmeti, yaklaşma kontrol hizmeti ve meydan kontrol hizmeti olmak üzere üçe ayrılır. Bu çalışmada, saha kontrol hizmeti veren kontrolörlerin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Saha kontrolündeki hava trafik kontrolörleri, kendilerine tahsis edilen hava sahasındaki uçakların konumunu radar ekranı ile takip ederler. Aynı zamanda pilotlarla belirli radyo frekansları üzerinden haberleşerek gerekli talimatları verirler. Her bir radar ekranının başında bir yönetici (executive) ve bir planlayıcı (planner) olmak üzere genellikle iki kontrolör bulunur. Yönetici kontrolör, emniyetli bir trafik akışını sağlamak amacıyla gerekli talimatları vermek için pilotlarla iletişime geçen kişidir. Planlayıcı kontrolörler ise uçaklar arasındaki olası çakışmaları belirleyip yönetici kontrolör ile paylaşan kişidir. Bunun yanında, sorumluluğu altındaki sektöre uçakların giriş ve çıkış koşullarını komşu sektörlerin kontrolörleri ile koordine etmektedir.

Literatürde farklı iş alanları için uygulanan personel çizelgeleme problemi için çeşitli çözüm yaklaşımları ve algoritmalar önerilmiştir. Koçtepe vd. kültürel, bilimsel etkinlikler ve eğlence sektöründe çalışan organizasyon görevlilerinin çizelgelenmesi problemini ele almışlardır. 0-1 tam sayılı programlama modeli ile özel bir şirket için düzenlenen bölge bayii toplantısı etkinliğinde gerekli personel sayısı ve yetkinliklerini belirlemişlerdir. Personelin yetkinliklerine uygun biçimde görev ataması yapmışlardır [5]. Eren vd. kamuda çalışan temizlik personelinin çizelgelenmesi problemini ele almışlardır. Hedef

programlama modeli kurarak belirli kıdemdeki personelin görev sayısı hedefine ulaşmasını istemişlerdir [6]. Azaiez ve Al Sharif hemşirelerin çizelgelenmesi için 0-1 doğrusal hedef programlama modeli önermişlerdir. Hastane açısından personelin fazla mesaisinden doğan ek maliyetleri azaltarak sürekli bir hizmet sağlamayı hedeflemişlerdir. Personel açısından ise gece ve hafta sonu vardiya dağılımlarının adil bir şekilde olması hedeflenmiştir [7]. Bağ vd. ise analitik ağ prosesi ve hedef programlama ile hemşire çizelgeleme probleminin çözümünü gerçekleştirmişlerdir [8]. Bunun yanında Özcan vd. hidroelektrik santrallerinde çalışan personelin aylık vardiya çizelgelerini hedef programlama kullanarak planlamışlardır. Personelin dikkat ve motivasyonunu artırmak amacıyla vardiyalara personelin kıdem seviyelerine göre atamalar yapmışlardır [9]. Demirel vd. ANKARAY güvenlik personelinin vardiya çizelgeleme problemini ele almışlardır. Hedef programlama kullanarak her bir personel için çalıştıkları vardiya sayılarını eşitlemeyi amaçlamışlardır. Bir aylık vardiya planına göre, personellerin hangi istasyonda, hangi vardiyada çalışacağı ve hangi günler tatilde olacağını elde etmişlerdir [10]. Aykin çalışmada birden fazla dinlenme ve öğle yemeği mola penceresi içeren vardiyaların planlanması için bir tamsayı programlama modeli sunmuştur. Vardiya-mola kombinasyonları için yeni bir yaklaşım önerisinde bulunmuştur. Bu önerisinin büyük boyutlu vardiya çizelgeleme problemlerini optimal olarak çözmeye çok fayda sağladığını göstermiştir [11].

Personel çizelgelemenin uygulandığı alanlardan biri de hava trafik kontrolörlerinin çizelgelenmesi problemidir. Conniss vd. hava trafik kontrolörlerinin çizelgelenmesi problemi için bir ağgözlü sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Zamanı 30 dakikalık bloklar halinde böldükleri algoritmada, bir kontrolörün çalışma süresini 2 saat ile sınırlandırırken dinlenme süresini minimum 30 dakika olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın amacı kontrolörlerin atandıkları farklı pozisyon sayısını maksimize etmektir [12]. Tello vd. belirli bir hava sahası sektörü için gerekli olan kontrolör sayısını en küçükleme amacıyla kontrolörlerin vardiya planlamasını yapmışlardır. Çözüm yaklaşımı olarak çok başlangıçlı tavlama benzetimi kullanmışlardır. Önerilen yaklaşımda, ilk uygun çözümleri optimize edilmiş şablonlara dayalı bir sezgisel yöntem kullanarak oluşturmuşlardır. Bir kontrolörün ardışık vardiyalarda en fazla iki farklı sektörde çalışmasına izin vermişlerdir [13]. Sonrasında Tello vd. problemi çok amaçlı olarak ele almışlar ve kontrolörlerin çalışma-dinlenme süreleri,

çalıştıkları farklı pozisyon sayıları ve iş yükü dağılımlarıyla ilgilenmişlerdir. İlk çalışmada minimum çalışma ve dinlenme sürelerini 30 dakika olarak belirlerken ikincisinde 15 dakika olarak belirlemişlerdir. Ayrıca ikinci çalışmada ardışık vardiyalarda farklı sektörlerde çalışma sayısını 3'e çıkarmışlardır [14]. Jiménez-Martín vd. kontrolörlerin çizelgelenmesi problemini taktiksel olarak ele almışlardır. Bu durumda trafikte beklenmedik bir artış meydana gelmesi, bazı personelin hastalanması gibi olayları göz önünde bulundurarak anlık trafik talebine göre kontrolörleri yeniden atamışlardır. Yeni atamalarda mevcut kontrolörlerin daha önceden yaptıkları işleri de hesaba katmışlardır. Minimum çalışma-dinlenme sürelerini 15 dakika olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı benimsemişlerdir. İlk aşamanın amacı mevcut kontrolörler ile açılan ya da kapanan sektörler dikkate alınarak muhtemel gerçekleştirilemez başlangıç çözümü oluşturmaktır. İkinci aşamada ise tavlama benzetimi ve değişken komşuluk araması yöntemlerini kullanarak uygun çözüm elde edilmektedir [15]. Wang ve Ke yaptıkları çalışmada havacılık kazalarının doğrudan olmasa bile %21'inin yorgunluk ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple kontrolörlerin yorgunluğunu azaltmak amacıyla tam sayılı programlama kullanarak vardiya planlaması yapmışlardır [16]. Josefsson vd. iki veya daha fazla havalimanındaki operasyonların uzaktan kontrol edilebildiği uzaktan kule merkezlerinde çalışan kontrolörlerin çizelgelenmesi problemi için doğrusal karar modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında gerekli kontrolör sayısının, havalimanı başına ortalama kontrolör sayısının ve pozisyon değişikliği sayısının enküçüklenmesi amaçları için çözümler elde etmişlerdir [17]. Hernandez-Romero vd. çeşitli hava olaylarının ATCO iş yükü üzerindeki etkisini ATCO'larla yapılan yapılandırılmış görüşmeler yoluyla incelemişlerdir. Personel çizelgelenmesi için Karma Tamsayı Programlama (MIP) modele belirsiz etkili hava olaylarını dahil etmişlerdir [18]. Kontrolörlerin simülasyon eğitimleri sürecinde önemli rol oynayan pseudo-pilot pozisyonundaki kişilerin iş yükü dağılımlarını dengelemek amacıyla Dönmez vd. bir MIP model geliştirmişlerdir. Bu amaçla ilk olarak matematiksel model ile pilotlara eşit periyot ataması yapmışlardır. Daha sonra pilotların simülasyon görevlerini ağırlıklandırmak için, NASA Görev Yükü İndeksini (NASA TLX) kullanmışlardır [19].

Bu çalışmada, Türkiye'de saha kontrol hizmetinde çalışan hava trafik kontrolörlerinin vardiya planlaması ve çizelgelenmesi problemi iki aşamada

çözülmüştür. Saha kontrol hizmetinde çalışan kontrolörler belirli ekiplerden oluşmaktadır. Yapılan çalışmada bu durum dikkate alınarak modelin ilk aşamasında ekiplerin 10 günlük vardiya planlaması yapılmıştır. Bu sürede ekiplerin belirli mesai koşullarını sağlamak şartıyla çalışacakları gün ve vardiyalar belirlenmiştir. İkinci aşamada ise ekiplerin atandıkları vardiyalardaki çizelgelenmeleri yapılmıştır. Çizelgeleme yapılırken kontrolörlerin çalışma şartları hesaba katılarak atandıkları vardiyalardaki çalışma ve dinlenme saatleri ile çalışacakları sektör ve birlikte çalışacakları iş arkadaşı belirlenmiştir. Her iki aşamada da amaç kontrolörlerin iş yükü dağılımını kendileri arasında dengelemektir.

Literatürde ele alınan problemler ile karşılaştırıldığında Türkiye'deki kontrolörlerin vardiya planlamalarında ve çalışma koşullarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar bu çalışmayı literatürden ayıran önemli özelliklerdir. Örneğin, literatürdeki çalışmalarda kontrolörler tüm vardiyalarda çalışabilirken ele alınan problemde vardiya planlaması belirli ekiplerin belirli vardiyalarda çalışmaları gerektiği koşuluna göre yapılmaktadır. Ayrıca belirli ekipler yalnızca belirli hava sahalarını kontrol edebilme yetkinliğine sahiptirler. Bu durum belirli kişilerin belirli pozisyonlarda çalışması koşulundan farklıdır. Bu çalışmada iş yükü dağılımını dengelemek amacıyla gerçeğe uygun olarak kontrolörlerin hem yönetici hem de planlayıcı pozisyonlarında çalışmalarına izin verilmiştir. Bunun yanı sıra, kontrolörlerin çalışma ve dinlenme saatleri esnek olmayıp (en az 30 dk. ve en fazla 2 sa. gibi) 2 saat çalışma ve 2 saat dinlenme şeklindedir.

Daha önce de belirtildiği gibi çalışmada bir kontrolörün iş yükü belirli bir zaman diliminde belirli trafik ve hava koşullarında kontrol ettiği toplam uçak sayısı olarak alınmıştır. Ancak, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yerel ve transit uçuşların kontrolörler açısından farklı iş yüküne sahip olmaları hesaba katılmıştır. Bunun yanında mevsimsel farklılık, farklı hava olayları ve hava koşullarının olması hava trafik akışını etkileyen faktörlerdir. Bu da doğrudan kontrolör iş yükünü etkilemektedir. Çalışmada hesaba katılan bu duruma örnek olarak, özellikle kış aylarında pilotların olumsuz hava koşullarından kaçınmak isterken kontrolörlerin daha fazla uçağa daha fazla talimatta bulunmasını verebiliriz. Ele alınan yeniliklerden bir diğeri de tecrübeli ve tecrübesiz kontrolör ayrımının hesaba katılmasıdır. Aynı hava koşulları için, belirli bir trafik talebinin tecrübeli ve tecrübesiz kontrolörler üzerinde farklı fizyolojik ve psikolojik etkileri olabilir. Bu nedenle, tecrübesiz

kontrolörlerin tecrübeli kontrolörlerle birlikte çalışması önerilmektedir, bu sayede tecrübesiz kontrolörler deneyim kazanarak daha iyi bir performans sergileyebilirler. Önerilen matematiksel modelde, yerel-transit trafik talep oranlarının ve tahmini hava durumunun toplam iş yüküne olan etkisini gösteren katsayılar kullanıcı tarafından belirlenebilirler.

Çalışmada önerilen iki aşamalı matematiksel model ile kontrolörlerin hem vardiyalarının belirlenmesi hem de çalışma saatlerinin çizelgelenmesi yapılabilmektedir. Kontrolörlerin iş yüklerini dengelemek amacıyla hedef programlama yönteminin kullanılarak çözümlerin elde edildiği bu çalışmanın farkı ve literatüre sağladığı katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Belirli ekiplerin yalnızca belirli vardiyalarda çalışmaları koşuluyla atamaların yapılması
- Esnek olmayan çalışma saatleri için çizelgelenmenin yapılması
- Geliştirilen modelde iş yükü açısından yerel ve transit uçuş ayırımının hesaba katılması
- Geliştirilen modelde iş yükü açısından mevsimsel farklılık ve hava koşullarının hesaba katılması
- Tecrübeli ve tecrübesiz kontrolör ayırımının hesaba katılması
- Kontrolörlerin iş yüklerinin kendi aralarında dengelenmesi

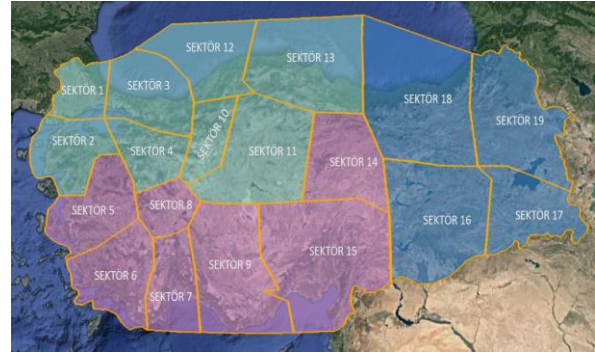
Çalışmanın ikinci bölümünde hava trafik kontrolörleri ve Türkiye'deki sektörler hakkında bilgiler verildikten sonra Türkiye'deki kontrolörlerin çizelgelenmesi problemi ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, tanımlanan problem için geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Dördüncü bölümde hedef programlama ve nasıl uygulandığı hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde ise modelin test edildiği örnek uygulama yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise sonuçlar ve öneriler ifade edilmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMI (DESCRIPTION OF THE PROBLEM)

Hava trafik kontrolörü belirli bir zaman diliminde sınırlı sayıda uçağı kontrol edebilir. Bu sebeple hava sahaları birden fazla alana ayrılırlar. Bu alanlar sektör olarak adlandırılır. Bazı sektörler ise çok yoğun trafik talebine sahip oldukları için kendi içerisinde üst (U) ve alt (L) olmak üzere iki seviye katmanına ayrılırlar. Tahmini trafiğı kontrol etmek için önceden tasarlanan bu sektör yapılandırılmaları

hava sahası sektör konfigürasyonu olarak adlandırılır.

Türkiye hava sahası ve sektör yapısı Şekil 1'de verilmiştir [20]. Toplam 19 tane sektör bulunmaktadır. Bu sektörlerin her biri bir yönetici ve bir planlayıcı kontrolör tarafından kontrol edilir. Üst ve alt katmanlara ayrılmış sektörler trafik talebinin az olduğu zamanlarda aynı yönetici ve planlayıcı kontrolörlerin sorumluluğunda iken trafik talebinin yoğun olduğu zamanlarda farklı yönetici ve planlayıcı kontrolörlerin sorumluluğundadır.



Şekil 1. Türkiye hava sahası sektörlerindeki adalar [20] (Islands in Turkish airspace sectors [20])

Kontrolörlerin sorumlu olduğu sektörler önceden belirlenmektedir. Yani, kontrolörler yalnızca belirli sektörlerde çalışabilmektedirler. Bu sebeple Türkiye hava sahasındaki sektörler gruplandırılarak 3 adaya ayrılmıştır. Her bir kontrolör yalnızca görevlendirildiği adada yer alan sektörlerde çalışabilmektedir. Adalar Şekil 1'de farklı renklerle gösterilmiştir. Böylece hangi adada hangi sektörlerin yer aldığı da görülmektedir. Adalarda yer alan sektörler ve bu sektörlerin alt ve üst katmanlarının birlikte ya da ayrı ayrı kontrol edilme durumları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Adalarda yer alan sektörler (Sectors on the islands)

SEKTÖRLER	ADALAR		
	Ada-1	Ada-2	Ada-3
Sektör 1 – 2 L/U	✓		
Sektör 3 – 4 L/U	✓		
Sektör 5 – 6 L/U		✓	
Sektör 7 – 8 – 9 L		✓	
Sektör 7 – 8 – 9 U		✓	
Sektör 10 – 11 L/U	✓		
Sektör 12 L/U	✓		
Sektör 13 L/U	✓		
Sektör 14 L/U		✓	
Sektör 15 L/U		✓	
Sektör 16 – 17 L			✓
Sektör 16 – 17 U			✓
Sektör 18 – 19 L/U			✓

Buna göre Ada – 1’de toplam 5, Ada – 2’de toplam 5, Ada – 3’de toplam 3 sektör grubu bulunmaktadır. Kontrolörlerin çalışacakları sektörleri bu verilere göre de açıklayabiliriz. Örneğin; Ada-1’de görevli bir kontrolör Sektör 1-2-3-4-10-11-12-13’den herhangi birisinde çalışabilirken diğer sektörlerde çalışmamaktadır. Ayrıca bir kontrolör grupta yer alan sektörlerden aynı anda sorumludur. Buna göre, çalışacağı saatte bu adadaki ilk grup olan Sektör 1-2 L/U’de çizelgelemiş ise Sektör 1, Sektör 2 ve bu sektörlerin her iki katmanından da sorumludur. Her bir kontrolör aynı mesaide farklı sektör gruplarında çalışabilir. Bu çalışma düzenine uygun olarak farklı ekipler oluşturulmuştur. Tüm ekiplerde adalardaki sektörleri kontrol edecek kadar yeterli sayıda kontrolör bulunmaktadır.

Oluşturulan ekipler belirli bir düzene göre vardiyalara atanmaktadır. Sonrasında ekiplerdeki kontrolörlerin atandıkları vardiyalar için çizelgelemesi yapılmaktadır. Çalışmamızda bağımsız bir şekilde ele alınan Aşama-1 ve Aşama-2 vardiyası atamaları ve kontrolör çizelgelemeleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

2.1. Aşama – 1 (The Stage-1)

Türkiye hava sahasındaki sektörleri kontrol eden yol safhası kontrolörleri 5 ekipten oluşmaktadır. Bu ekiplerin çalışacağı gündüz ve gece olmak üzere bir günde iki vardiyası bulunmaktadır. Ekiplerin vardiyası çalışma düzeni Tablo 2’de verilmiştir. Her bir ekip bir vardiyası çalışıp iki vardiyası dinlendikten sonra tekrar bir vardiyası çalışıp altı vardiyası dinlenmektedir. Vardiyaların 12’şer saatten oluştuğunu düşünürsek; her bir ekip 12 saatlik

vardiyada görevlendirildiği saatlerde çalışıp 24 saat dinlenmektedir. Sonrasında tekrar 12 saatlik vardiyada görevli olduğu saatlerde çalışıp 72 saat dinlenmektedir.

Tablo 2. Beş ekip için vardiyası çalışma düzeni (Shift work order for five teams)

Gün	Gündüz Vardiyası	Gece Vardiyası
1	A Var-1	B Var-2
2	C Var-3	A Var-4
3	D Var-5	C Var-6
4	E Var-7	D Var-8
5	B Var-9	E Var-10
6	A Var-11	B Var-12
7	C Var-13	A Var-14
8	D Var-15	C Var-16
9	E Var-17	D Var-18
10	B Var-19	E Var-20

Tablo 2’den de görüldüğü gibi, A ekibi Var-1 gündüz vardiyasında çalıştıktan sonra iki vardiyası dinlenip Var-4 gece vardiyasında çalışmaktadır. Daha sonra da altı vardiyası dinlenip Var-11 gündüz vardiyasında çalışmaktadır. B ekibi ise Var-2 gece vardiyasında çalıştıktan sonra altı vardiyası dinlenip Var-9 gündüz vardiyasında çalışmaktadır. Sonrasında iki vardiyası dinlenip Var-12 gece vardiyasında çalışmaktadır. Tüm ekiplerin vardiyası çalışma düzenleri bu döngüyle devam etmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere 5 ekibin çalışma döngüsü 10 günde tamamlanmaktadır.

Ekiplerin vardiyalara atanmasında 5 farklı durum mevcuttur. Bu durum personelin aylık çalışma saatlerini doldurması, çizelgenin kurallara göre yapılması sonucu ortaya çıkmıştır. Ekipler, vardiyası 1-4-11-14, vardiyası 2-9-12-19, vardiyası 3-6-13-16, vardiyası 5-8-15-18 ve vardiyası 7-10-17-20 durumlarından birine atanabilmektedir. Bu sebeple ilk aşama modelde 10 gün - 20 vardiyası çalışma düzenine göre ekiplerin vardiyalara atamaları yapılmıştır. Aşama-1 modelinin amacı ekipler için yerel-transit trafik talebi ve hava durumu etkisinden kaynaklanan 10 günlük iş yükü dağılımını dengelemektir.

2.2. Aşama – 2 (The Stage-2)

İlk aşamada ekiplerin çalışacakları vardiyaları belirlendikten sonra bu aşamada kontrolörlerin atandıkları vardiyalardaki çizelgelemeleri yapılmaktadır. Ekiplerin bünyesinde tüm adalardaki sektörleri kontrol edebilecek kadar kontrolör bulunmaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi kontrolörler yalnızca sorumlu oldukları adalardaki sektörlerde görevlendirilmektedirler. Bu sebeple,

kontrolörlerin atandıkları vardiyalardaki çizelgeleri de adalar için ayrı ayrı yapılmaktadır. Çalışmamızın ikinci aşamasında önerilen matematiksel model ile her bir adada görevli olan kontrolörlerin çizelgesi yapılmıştır. Çizelgeleme yapılırken Aşama-1'de atandıkları vardiyalar için trafik talebi ve tahmini hava durumu koşulları dikkate alınmıştır. Böylece, bu koşullardan kaynaklanan iş yükünü dengelemek amacıyla kontrolörlerin çizelgesi yapılmıştır.

Daha önce belirtildiği gibi, bir kontrolör hem yönetici hem de planlayıcı olarak çalışabilmektedir. Ancak, herhangi bir sektöre personel görevlendirilirken tecrübesiz kontrolörün yanına tecrübeli kontrolör verilmesi önerilmektedir. Kontrolörlerin atandıkları vardiyalarda çalışma ve dinlenme saatleri ikişer saatlik periyotlar halindedir. Yani, bir kontrolör 2 saat çalışıp 2 saat dinlenmelidir. İkinci aşama matematiksel modelde tecrübeli-tecrübesiz kontrolör eşleşmesi ve ikişer saatlik çalışma-dinlenme düzeni dikkate alınmıştır.

Türkiye'deki yol kontrolörlerinin çalışma koşullarını maddeler halinde özetleyecek olursak:

- Toplam 5 ekip bulunmaktadır.
- Ekipler 1 vardiya çalış – 2 vardiya dinlen – 1 vardiya çalış– 6 vardiya dinlen düzeniyle çalışmaktadır.
- Ekipler farklı sektörlerden oluşan 3 adada çalışacak alt gruplardan oluşmaktadır.
- Kontrolörler yalnızca görevli oldukları ada bünyesindeki sektörlerde çalışabilmektedir.
- Aynı vardiyada farklı sektörlerde görevlendirilebilirler.
- Kontrolörler vardiyalarda 2 saat çalışıp 2 saat dinlenmelidirler.
- Her sektör bir yönetici ve bir planlayıcı kontrolör tarafından kontrol edilir.
- Tecrübesiz kontrolörler, tecrübeli kontrolörler ile çalışmalıdır.

Önerilen modelde, zorunlu ve gevşek kısıtların olduğu hedef programlama yöntemi kullanılmıştır. Önerilen modelin indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtlar aşağıda sunulmuştur.

2.3. Trafik Talebi ve Tahmini Hava Durumu (Traffic Demand and Forecast Weather)

Bu bölümde Türkiye hava sahasındaki sektörler için yerel ve transit uçuş talep oranlarının nasıl belirlendiğinden bahsedilmiştir. Hava koşullarının hava trafik kontrolörlerin iş yüküne olan etkisi hakkında bilgi verilmiştir. Bunun yanında yaz ve kış

ayları için tahmini hava durumu verisinin nasıl üretildiği ve kontrolör iş yüküne olan etkisinin nasıl belirlendiği anlatılmıştır.

2.3.1. Sektörler İçin Trafik Verisi (Traffic Data for Sectors)

Türkiye hava sahasındaki uçuş oranlarını belirlemek için Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) tarafından paylaşılan veriler incelenmiştir. Buna göre, 2018 – 2021 yılları arasında yapılan tüm uçuşların ortalama %79,12'sini yerel uçuşlar ve ortalama %20,88'ini transit uçuşlar oluşturmuştur [21]. Yerel uçuşların sektörlerdeki dağılım oranlarını belirlemek için 2018 – 2021 yılları arasında havalimanlarında gerçekleşen toplam uçuş sayıları dikkate alınmış ve her bir havalimanı için trafik oranı belirlenmiştir. Sektörlerdeki transit uçuş oranlarını belirlemek için de çevrimiçi harita üzerinden uçuş bilgilerini anlık olarak takip edebildiğimiz Flightradar24 web sitesinden yararlanılmıştır [22]. Web sitesinin filtreleme özelliğini kullanarak Türkiye hava sahası üzerinde gerçekleşen yol safhası uçuşları 1 hafta boyunca takip edilmiş ve trafik oranları belirlenmiştir. Her bir sektör için elde edilen yerel ve transit trafik dağılım oranları Tablo 3'de verilmiştir. Ancak, sektörler için trafik talepleri saatlik olarak değiştiği için bu ortalama oranların yanında gece ve gündüz trafikleri için ayrı ayrı olmak üzere en düşük ve en yüksek değerler de hesaba katılmıştır. Bu oran ve değerlere göre de her bir sektör için trafik talep aralıkları belirlenmiştir. Böylece, sektörlerin saatlik trafik veri setleri bu talep aralıklarına göre rassal olarak oluşturulmuştur.

Tablo 3. Türkiye hava sahasındaki sektörler için yerel ve transit uçuş oranları [21,22] (Local and transit flight rates for sectors in Turkish airspace [21,22])

Sektör	Yerel trafik oranı (%)	Transit trafik oranı (%)	Sektör	Yerel trafik oranı (%)	Transit trafik oranı (%)
1	1,96	5,21	11	1,02	9,38
2	2,02	2,08	12	0,04	10,42
3	28,40	3,13	13	1,43	8,33
4	16,25	1,04	14	1,34	6,25
5	7,22	2,08	15	5,12	2,08
6	5,32	3,13	16	2,95	5,21
7	11,51	3,13	17	0,75	3,13
8	2,51	2,08	18	2,45	14,58
9	0,98	7,29	19	2,33	2,08
10	6,40	9,38			

2.3.2. Hava Koşullarının Etkisi ve Tahmini Hava Durumu (Effect of Weather Conditions and Forecast Weather)

Hava koşulları, hava trafik kontrolörlerinin iş yükünü etkileyen faktörlerden birisidir. Özellikle olumsuz hava koşulları, hava trafik kontrolörlerinin iş yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Şiddetli rüzgarlar, sis veya yağış nedeniyle düşük görüş mesafesi ve türbülans, kontrolörlerin kendi sorumluluk alanlarındaki trafik akışını emniyetli bir şekilde yönetmelerini zorlaştırabilir. Özellikle kış aylarında karşılaşılan bu koşullar, uçuşların gecikmesine, iptal edilmesine veya yönlendirilmesine neden olabilir. Bu durum, hava trafik kontrolörlerinin daha fazla çalışmasına ve daha fazla zorlukla karşı karşıya kalmalarına neden olabilir.

Ayrıca, olumsuz hava koşulları nedeniyle hava trafik kontrolörleri, daha fazla zaman harcayarak uçuşlar arasındaki mesafeyi artırmayı ve uçuşlar arasındaki zamanı arttırmayı düşünebilirler. Örneğin, şiddetli rüzgarlar uçağın amaçlanan uçuş yollarından sapmasına neden olabilir ve kontrolörlerin pilotlara gözden geçirilmiş talimatlar vermesini gerektirebilir. Düşük görüş mesafesi, kontrolörlerin uçağı görsel olarak izlemesini zorlaştırabilir ve durumsal farkındalığı sürdürmek için ek radar ve diğer elektronik sistemlerin kullanılmasını gerektirebilir. Ayrıca türbülans pilotların uçak kontrolünü sürdürmelerini zorlaştırabilir ve kontrolörlerin ek rehberlik ve yardım sağlamasını gerektirebilir. Genel olarak, olumsuz hava koşulları, kontrolörler üzerindeki zihinsel ve fiziksel talepleri artırabilir ve potansiyel olarak artan stres ve yorgunluğa yol açabilir. Bu nedenle, hava koşullarının değişebileceği ve bu değişimlerin kontrolörlerin iş yüküne olan etkisi hesaba katılmalıdır.

Hava durumu tahminlerini kullanarak hava sahalarındaki hava koşulları önceden tahmin edilebilir. Bu tahminler doğrultusunda, hava trafik kontrolörlerinin çizelgelemesi yapılabilir. Özellikle, beklenen olumsuz hava koşulları durumunda, hava trafik kontrolörlerinin iş yükleri dengelenerek, daha az çalışma yükü altına alınabilir. Bu sayede, hava trafik kontrolörleri, beklenen olumsuz hava koşullarının etkisi altında daha az yük altında çalışarak, daha iyi performans gösterebilirler. Ayrıca, hava durumu tahminleri doğrultusunda, hava trafik kontrolörlerinin çalışma saatleri belirlenirken olumsuz hava koşullarının daha fazla

olduğu saatler dikkate alınarak iş yükü dengelenebilir. Genel olarak, hava durumu tahminleri, hava trafik kontrolörlerinin çizelgelemesi yapılırken dikkate alınarak, iş yükleri dengelenebilir ve onların performansını artırmaya yardımcı olabilir.

Tahmini hava koşulları veri setinde hava koşullarının açık, sisli, yağışlı, rüzgârlı ve fırtınalı olması gibi durumlar için kış ve yaz aylarında görülme sıklıkları ve bu hava koşullarının iş yüküne olan etki katsayıları Tablo 4'de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 4. Hava koşulları görülme sıklığı oranları ve iş yükü etki katsayıları (Weather conditions incidence rates and workload impact coefficients)

Hava Koşulları	Görülme sıklığı (Kış ayları)	Görülme sıklığı (Yaz ayları)	İş yükü katsayı
Açık	<% 10	<% 30	0<w<1
Sisli	% 10 - % 20	% 30 - % 50	1<w<2
Yağışlı	% 20 - % 30	% 50 - % 70	2<w<3
Rüzgârlı	% 30 - % 50	% 70 - % 80	3<w<5
Yoğun yağışlı	% 50 - % 70	% 80 - % 90	5<w<7
Fırtınalı	% 70 - % 100	% 90 - % 100	7<w<10

Kış ayları ile yaz aylarında hava olaylarının görülme sıklıkları ters orantılıdır. Örneğin, yaz aylarında açık hava koşullarının görülme sıklığı yüksek olduğu için, açık hava koşullarının iş yüküne olan etkisi düşük olur ve bu da iş yükünü azaltır. Kış aylarında ise, yoğun yağışlı hava koşullarının görülme sıklığı yüksek olduğu için iş yüküne olan etkisi yüksek olur ve bu da iş yükünü artırır. Buna göre yaz ve kış ayları için tahmini hava koşulları saatlik dilimlerde tüm sektörler için rassal olarak atanmıştır. Böylece iş yüküne olan etkileri de belirlenmiştir.

Hava koşullarının görülme sıklığı yıl içerisinde mevsimlerden etkilenir. Bu nedenle, hava koşullarının iş yüküne olan etkisini tahmin etmek için hava koşullarının yıl içerisinde görülme sıklığının mevsimlere göre değiştiği dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, yaz ve kış ayları için ayrı ayrı veri setleri oluşturulmuştur ve bu veri setlerinde hava koşullarının görülme sıklığı mevsime göre belirlenmiştir. Bu sayede, hava koşullarının iş

yüküne olan etkisi tahmin edilirken mevsimlerin de dikkate alınması sağlanmıştır ve hava koşullarının iş yüküne olan etkisinin daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi mümkün olmuştur.

Yerel ve transit trafik talepleri ile hava koşullarının iş yüküne olan etkileri farklı değer aralıklarına sahip oldukları için büyük olan değer diğerine göre daha baskın olacaktır. Bunu engellemek trafik talepleri ve hava durumu değerleri, bu değerlerin aldığı en büyük değere bölünerek normalleştirilme yapılmıştır.

3. ÖNERİLEN İKİ AŞAMALI MATEMATİKSEL MODEL (PROPOSED TWO-STAGE MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada ele alınan 2 modelin de amaç fonksiyonları belirlenen hedef değerlerinden sapmaları enküçükleme. Eğer her bir çalışanın iş yükü değeri toplamının enküçüklenmesi amaçlanırsa bazı çalışanların değerleri diğerlerinden daha büyük veya daha küçük değerler alabilirdi. Fakat bu çalışmayla amaçlanan her bir çalışanın iş yükü değerini olabildiğince birbirine eşitlemektir. Hedef değer toplam iş yükünün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Çalışanların birbirine yakın iş yüklerinin olması daha adil bir çalışma düzeni oluşturacaktır.

3.1. Aşama – 1 (Ekiplerin Vardiyalara Atanması) (The Stage – 1 (Assigning Teams to Shifts))

İndisler

a : Ekip indisi $a = 1, 2, \dots, m$
 v : Vardiya indisi $v = 1, 2, \dots, n$
 r : Çalışma düzeni indisi $r = 1, 2, \dots, m$

Parametreler

m : Ekip sayısı
 n : Vardiya sayısı
 dd_v : v vardiyasındaki toplam yerel uçuş sayısı
 dt_v : v vardiyasındaki toplam transit uçuş sayısı
 h_v : v vardiyasındaki hava durumu etkisi
 w_1' : Yerel uçuş sayısının toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 w_2' : Transit uçuş sayısının toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 w_3' : Hava durumunun toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 \overline{load}^1 : Ekip başına düşen ortalama iş yükü

Ekip başına düşen ortalama iş yükü Denk. 1'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu oran aynı

zamanda her bir ekip için hedeflenen iş yükünü göstermektedir. Yerel uçuş sayısının, transit uçuş sayısının ve hava durumunun toplam iş yüküne olan ağırlık katsayıları (w_1' , w_2' , w_3') kullanıcı tarafından belirlenebilir. Bu ağırlıkların toplamı 1'e eşit olmalıdır.

$$\overline{load}^1 = \sum_v \frac{w_1' dd_v + w_2' dt_v + w_3' h_v}{m} \quad (1)$$

Karar Değişkenleri

$$x_{av} = \begin{cases} 1, a \text{ ekibi } v \text{ vardiyasına atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ar} = \begin{cases} 1, a \text{ ekibi } r \text{ çalışma düzenine atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$load_a$: Her bir a ekibinin toplam iş yükü

s_a^+ : Her bir a ekibinin hedeflenen iş yükünden pozitif sapma değişkeni

s_a^- : Her bir a ekibinin hedeflenen iş yükünden negatif sapma değişkeni

Amaç Fonksiyonu

$$\min z = \sum_a s_a^+ + s_a^- \quad (2)$$

Kısıtlar

$$x_{a1} + x_{a4} + x_{a11} + x_{a14} = 4y_{a1} \quad \forall a \quad (3)$$

$$x_{a2} + x_{a9} + x_{a12} + x_{a19} = 4y_{a2} \quad \forall a \quad (4)$$

$$x_{a3} + x_{a6} + x_{a13} + x_{a16} = 4y_{a3} \quad \forall a \quad (5)$$

$$x_{a5} + x_{a8} + x_{a15} + x_{a18} = 4y_{a4} \quad \forall a \quad (6)$$

$$x_{a7} + x_{a10} + x_{a17} + x_{a20} = 4y_{a5} \quad \forall a \quad (7)$$

$$\sum_r y_{ar} = 1 \quad \forall a \quad (8)$$

$$\sum_a x_{av} = 1 \quad \forall v \quad (9)$$

$$load_a = \sum_v x_{av} (w_1 dd_v + w_2 dt_v + w_3 h_v) \quad \forall a \quad (10)$$

$$load_a - s_a^+ + s_a^- = \overline{load}^1 \quad \forall a \quad (11)$$

$$x_{av} \in \{0,1\} \quad \forall a, v \quad (12)$$

$$y_{ar} \in \{0,1\} \quad \forall a, r \quad (13)$$

$$load_a, s_a^+, s_a^- \geq 0 \quad \forall a \quad (14)$$

Denk. 2, ekiplerin iş yükünün ortalama iş yükünden sapmalarının toplamını en küçüklenmesini sağlayan amaç fonksiyonudur. Denk. 3- Denk. 8, ekiplerin vardiya 1-4-11-14, vardiya 2-9-12-19, vardiya 3-6-13-16, vardiya 5-8-15-18 ve vardiya 7-10-17-20 çalışma düzenlerinden sadece birine atanabilmesini sağlayan kısıtlardır. Denk. 9, her vardiyaya sadece bir ekibin atanmasını sağlayan kısıttır. Denk. 10, her ekibin iş yükünü hesaplamayı sağlayan kısıttır. Denk. 11, her ekibin ortalama iş yükünden negatif

ve pozitif sapmalarını hesaplanmasını sağlanmaktadır. Denk. 12- Denk. 14, işaret kısıtlarıdır.

3.2. Aşama – 2 (Kontrolörlerin Çizelgelenmesi) (The Stage – 2 (Scheduling of Controllers))

İndisler

i, j : Kontrolör indisi $i, j = 1, 2, \dots, q$
 k : Periyot indisi $k = 1, 2, \dots, f$
 l : Sektör indisi $l = 1, 2, \dots, g$

Parametreler

q : Kontrolör sayısı $q = 4g$
 f : Periyot sayısı $f = 6$
 g : İlgili adadaki sektör grup sayısı $g = 5$ (Ada-1), 5 (Ada-2), 3 (Ada-3)
 dd_{kl} : k periyodunda l sektöründeki toplam yerel uçuş sayısı
 dt_{kl} : k periyodunda l sektöründeki toplam transit uçuş sayısı
 h_{kl} : k periyodunda l sektöründeki hava durumu etkisi
 t_i : i kontrolörün iş tecrübesi ($t_i = 2$ ise tecrübeli, $t_i = 1$ ise tecrübesiz)
 M : yeterince büyük pozitif bir sayı
 T : Tecrübeli kontrolörün tecrübesiz kontrolör ile çalışması durumunda ek iş yükü katsayısı ($T = 3$)
 w_1'' : Yerel uçuş sayısının toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 w_2'' : Transit uçuş sayısının toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 w_3'' : Hava durumunun toplam iş yüküne olan ağırlık katsayısı
 \overline{load}^2 : Kontrolör başına düşen ortalama iş yükü

Kontrolör başına düşen ortalama iş yükü oranı Denk. 15’de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu oran aynı zamanda her bir kontrolör için hedeflenen iş yükünü göstermektedir. Yerel uçuş sayısının, transit uçuş sayısının ve hava durumunun toplam iş yüküne olan ağırlık katsayıları (w_1'' , w_2'' , w_3'') kullanıcı tarafından belirlenebilir.

$$\overline{load}^2 = \sum_v \frac{w_1'' dd_{kl} + w_2'' dt_{kl} + w_3'' h_{kl}}{q} \quad (15)$$

Karar Değişkenleri

$$p_{ikl} = \begin{cases} 1, & i \text{ kontrolörü } k \text{ periyodunda } l \\ & \text{sektörüne atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$load_{ikl}$: k periyodunda l sektörüne atanan i kontrolörünün toplam iş yükü

s_i^+ : Her bir i kontrolörünün hedeflenen iş yükünden pozitif sapma değişkeni

s_i^- : Her bir i kontrolörünün hedeflenen iş yükünden negatif sapma değişkeni

Amaç Fonksiyonu

$$\min z = \sum_i s_i^+ + s_i^- \quad (16)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k,l} p_{ikl} = 3 \quad \forall i \quad (17)$$

$$\sum_i p_{ikl} t_i \geq 3 \quad \forall k, l \quad (18)$$

$$\sum_l p_{ikl} + p_{ik+1l} = 1 \quad \forall i, k < 6 \quad (19)$$

$$load_{ikl} + M(1 - p_{ikl}) \geq p_{ikl}(w_1 dd_{kl} + w_2 dt_{kl} + w_3 h_{kl}) \quad \forall i, k, l \quad (20)$$

$$+ T(4 - \sum_j p_{jkl} t_j)(t_i - 1)$$

$$\sum_{k,l} load_{ikl} - s_i^+ + s_i^- = \overline{load}^2 \quad \forall i \quad (21)$$

$$p_{ikl} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k, l \quad (22)$$

$$load_{ikl} \geq 0 \quad \forall i, k, l \quad (23)$$

$$s_i^+, s_i^- \geq 0 \quad \forall i \quad (24)$$

Denk.16, kontrolörlerin iş yükünün ortalama iş yükünden sapmalarının toplamının en küçüklenmesini sağlayan amaç fonksiyonudur. Denk. 17, her kontrolörün sadece 3 periyoda atanmasını sağlamaktadır. Denk. 18, bir periyodun bir sektörüne iki kişi atanmasını ve tecrübesiz kontrolörlerin yan yana atanmamasını sağlamaktadır. Denk. 19, bir kontrolörün ardışık periyotlara atanmamasını sağlayan kısıttır. Denk. 20, her kontrolörün iş yükünün hesaplanmasını sağlamaktadır. Denk. 21, her kontrolörün ortalama iş yükünden negatif ve pozitif sapmalarını hesaplayan kısıttır. Denk. 22 – Denk. 24, işaret kısıtlarıdır.

4. BULGULAR (RESULTS)

Çalışmada tanımlanan problem için geliştirilen iki aşamalı model test edilmiştir. Testlerde elde edilen sonuçlar, modellerin çözüm süreleri paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Kontrolörlerin iş yükünü etkileyen faktörler trafik talebi ve hava koşulları olarak alınmıştır. Öncelikle sektörler için trafik talepleri oluşturulmuştur. Sektörler için trafik verisi bölümünde yer alan Tablo 1 ve 2’de verilen yerel ve transit uçuş oranları dikkate alınarak her bir sektör için trafik talepleri rassal olarak üretilmiştir. Alt ve üst katmanlarında farklı kontrolörlerin atanması gereken sektörler için (Sektör 7 – 8 – 9 – 16 – 17) yerel ve transit trafik talep oranları belirlenirken alt

katmanlar için yerel uçuşların %70'i transit uçuşların %30'u, üst katmanlar için de tam tersi alınmıştır. Sonrasında tahmini hava koşulları yaz ve kış ayları için ayrı ayrı rassal olarak üretilmiştir. Yerel trafik talebinin, transit trafik talebinin ve hava durumunun ekiplerin ve kontrolörlerin iş yüküne olan katsayıları Denk. 1 ve Denk. 13'de verildiği gibi kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Oluşturulan testler için bu oranlar eşit olarak alınmıştır. Tüm testler için GAMS/CPLEX çözücüsü kullanılmıştır ve tüm test hesaplamaları 2.7 GHz, Intel Core i7 işlemcili ve 8 GB RAM kapasitesi olan bir bilgisayar ile yapılmıştır.

Geliştirilen matematiksel modelde Aşama-1 modelinin amacı tüm ekipler arasında iş yükünü eşitleyecek şekilde ekiplerin vardiyaya atamalarını yapmaktır. 10 gün – 20 vardiya için 5 ekibin yaz ve kış vardiyaya atama sonuçları çok kısa sürelerde elde edilebilmiştir. Geliştirilen aşama-2 modelinin amacı ise her bir adada çalışan kontrolörler arasında iş yükünü dengeleyecek şekilde çizelgeleme yapmaktır. Toplamda 3 sektörün bulunduğu Ada – 3 için sonuçlar ortalama 17 saniyede elde edilmiştir. Ancak toplamda 5 sektörün bulunduğu Ada – 1 ve Ada – 2 için arzu edilen sürede eniyi çözümlere ulaşamamıştır. Bu sebeple 5 sektörün olduğu adalardaki kontrolörlerin çizelgelendiği testler için artırma sayısı (10000000) olarak belirlenmiştir. Bu durumda elde edilen çözüm değeri ve eldeki en iyi çözümün en iyi alt sınır değerine uzaklığı olan “RelativeGap” bilgisi paylaşılmıştır.

Elde ettiğimiz çözümlerin kalitesi eniyi çözüme ne kadar uzak olduğumuza bağlıdır. Eniyi çözüm değerine ulaşamadığımız durumlarda, örneğin enküçükleme problemleri için eldeki alt sınır değeri olan en iyi tahmin (bestestimate) değerine ve o ana kadar elde ettiğimiz en iyi tamsayı çözüm (bestinteger) değerine sahip olmaktayız. Bu iki değer arasındaki fark “absolutegap” olarak adlandırılmaktadır. GAMS'in OPTCR özelliği olan “relativegap(Gap_r)” (Denk. 21), absolutegap değerinin eldeki eniyi çözüm ya da eniyi tahmin değerlerinden en büyük olanına oranlanması ile elde edilmektedir [23]:

$$Gap_r = \frac{\text{eldeki eniyi tamsayı}}{\max\{|\text{eniyitahmin}|, |\text{eldeki eniyi tamsayı}|\}} \quad (21)$$

4.1. Yaz Vardiyalarının Sonuçları (Results of Summer Shifts)

4.1.1. Aşama – 1 Sonuçları (The Stage-1 Results)

Yaz aylarına denk geldiği kabul edilen 10 gün – 20 vardiya için ayrı ayrı oluşturulan trafik talebi ve hava durumunun kontrolör iş yüküne olan etkilerine göre ekiplerin atandıkları vardiyaya sonuçları ve ortalama iş yükü dağılımları Tablo 5'de verilmiştir. Bu sonuçlar için amaç fonksiyonu değeri 33 olarak elde edilmiştir. Bu değer hedeflenen iş yükü değerinden tüm ekiplerin sapmaları toplamını göstermektedir ve oldukça düşüktür. Yani ekiplerin iş yükü dağılımları tabloda da görüldüğü üzere oldukça birbirine yakındır.

Tablo 5. Ekiplerin atandıkları yaz vardiyaları ve ortalama iş yükü dağılımları (Summer shifts and average workload distribution of teams)

Ekip	Atandıkları Vardiyalar	İş yükü
1. Ekip	1,4,11,14	857
2. Ekip	3,6,13,16	838
3. Ekip	5,8,15,18	845
4. Ekip	2,9,12,19	848
5. Ekip	7,10,17,20	842

4.1.2. Aşama – 2 Sonuçları (The Stage-2 Results)

Yaz vardiyaları için ekiplerin çalışacakları vardiyaya atamaları yapıldıktan sonra her bir vardiyadaki kontrolörlerin çizelgelenmesi yapılmıştır. Ada – 1, 2 ve 3'de çalışan kontrolörlerin çizelgelenmesi sonucunda tüm vardiyalardaki toplam iş yükü değerleri sırasıyla Tablo 6, 7 ve 8'de paylaşılmıştır. Ayrıca tablolarda 5 sektörlü Ada – 1 ve 2 için yüzdesel relativegap değerleri ve 3 sektörlü olan Ada – 3 için çözüm süreleri saniye (sn.) olarak verilmiştir.

Tablo 6. Ada – 1'de çalışan ekiplerin yaz vardiyaları iş yükü dağılımları (Summer shift workload distribution of the teams working in Island – 1)

<i>v</i>	Toplam iş yükü	Gap _r (%)	<i>v</i>	Toplam iş yükü	Gap _r (%)
1	773	7	11	811	7
2	733	6	12	722	8
3	794	6	13	778	7
4	749	8	14	714	6
5	769	7	15	786	8
6	722	8	16	692	7
7	789	7	17	789	6
8	717	8	18	741	7
9	784	8	19	822	6
10	768	8	20	692	8

Tablo 7. Ada – 2’de çalışan ekiplerin yaz vardiyaları iş yükü dağılımları (Summer shift workload distribution of the teams working in Island – 2)

v	Toplam iş yükü	Gap_r (%)	v	Toplam iş yükü	Gap_r (%)
1	755	7	11	714	7
2	642	8	12	649	7
3	642	8	13	697	7
4	620	9	14	663	7
5	684	7	15	660	7
6	654	6	16	648	8
7	621	10	17	675	7
8	571	9	18	637	8
9	697	7	19	684	8
10	619	7	20	675	8

Tablo 8. Ada – 3’de çalışan ekiplerin yaz vardiyaları iş yükü dağılımları ve çözüm süreleri (Summer shifts workload distribution and solution times of teams working in Island – 3)

v	Toplam İş yükü	Çözüm Süresi (sn.)	v	Toplam İş yükü	Çözüm Süresi (sn.)
1	447	8	11	514	46
2	445	16	12	486	20
3	502	16	13	516	30
4	504	12	14	511	48
5	496	12	15	515	18
6	514	38	16	495	12
7	467	20	17	507	26
8	508	30	18	527	14
9	529	84	19	473	20
10	517	32	20	506	16

Tablo 6, 7 ve 8’de iş yükü sonuçları verilen tüm vardiyalar için kontrolörlerin çizelgenmesi sonuçları da elde edilmiştir. Bunlardan bir tanesi Tablo 9’da örnek olarak verilmiştir. Tabloda Ada – 1’de çalışan kontrolörlerin Vardiya – 18’deki çizelgesi görülmektedir. C1 – C11 tecrübeli kontrolör iken C12 – C20 tecrübesiz kontrolörlerdir. Kontrolörler 2’şer saatlik zaman dilimlerinde çalışıp dinlenmektedirler ve 12’şer saatlik vardiyalar 6 periyottan oluşmaktadır. Bu sebeple

vardiya 6 tane zaman dilimi olarak gösterilerek kontrolörlerin çalıştıkları zaman dilimleri renkli olarak gösterilmiştir. Hangi rengin hangi sektörü temsil ettiği şekilde verilmiştir.

Tablo 9’da verilen çizelgeye bakıldığında tüm kontrolörlerin 2 saat çalışıp 2 saat dinlenecekleri şekilde görevlendirmelerinin yapıldığı görülmektedir. Kontrolörlerin çoğunluğu iş yükünün dengelenmesi adına vardiyaları boyunca farklı farklı sektörlere atanmışlardır. Yani aynı sektöre vardiya boyunca farklı kontrolörler çizelgenmiştir. Bunun yanında tecrübesiz kontrolörlerin yanına tecrübeli kontrolörlerin atanması gerekmektedir. Çizelgede C12 – C20’nin görevlendirildiği sektörlere bakıldığında aynı zaman diliminde bu kontrolörlerden herhangi ikisi aynı sektöre atanmadığı görülmektedir. Ayrıca, bu çizelgelemeye göre kontrolörlerin iş yükü dağılımları da tabloda verilmiştir.

4.2. Kış Vardiyalarının Sonuçları (Results of Winter Shifts)

4.2.1. Aşama – 1 Sonuçları (The Stage-1 Results)

Yaz aylarına denk geldiği kabul edilen 10 gün – 20 vardiya için ayrı ayrı oluşturulan trafik talebi ve hava durumunun kontrolör iş yüküne olan etkilerine göre ekiplerin atandıkları vardiya sonuçları ve toplam iş yükü dağılımları Tablo 10’da verilmiştir. Bu sonuçlar için amaç fonksiyonu değeri 17 olarak elde edilmiştir. Bu değer hedeflenen iş yükü değerinden tüm ekiplerin sapmaları toplamını göstermektedir ve oldukça düşüktür. Yani ekiplerin iş yükü dağılımları Tablo 10’da da görüldüğü üzere oldukça birbirine yakındır.

Tablo 9. Ada – 1’de çalışan kontrolörlerin yaz vardiyası Var – 18’deki çizelgesi (Schedule on summer Shift-18 of controllers working on Island-1)

	Periyot 1	Periyot 2	Periyot 3	Periyot 4	Periyot 5	Periyot 6	İş yükü	Sektör
C1		Blue		Orange		Yellow	81	1-2 L/U
C2	Blue		Yellow		Green		71	3-4 L/U
C3	Orange		Red		Orange		85	10-11 L/U
C4	Yellow		Green		Blue		77	12 L/U
C5		Orange		Orange		Red	71	13 L/U
C6		Green		Blue		Blue	99	
C7		Yellow		Green		Blue	76	
C8	Green		Blue		Yellow		79	
C9		Blue		Yellow		Green	68	
C10		Red		Red		Orange	61	
C11	Red		Orange		Red		72	
C12	Green		Yellow		Orange		65	
C13	Orange		Red		Green		51	
C14		Red		Yellow		Orange	56	
C15	Blue		Orange		Yellow		84	
C16		Green		Red		Yellow	44	
C17	Yellow		Green		Red		48	
C18	Red		Blue		Blue		91	
C19		Orange		Blue		Red	82	
C20		Orange		Blue		Red	40	

Tablo 10. Ekiplerin atandıkları kış vardiyaları ve toplam iş yükü dağılımları (The winter shifts and total workload distribution of the teams)

Ekip	Atandıkları Vardiyalar	Toplam İş yükü
1. Ekip	3,6,13,16	1295
2. Ekip	5,8,15,18	1298
3. Ekip	1,4,11,14	1291
4. Ekip	7,10,17,20	1279
5. Ekip	2,9,12,19	1282

3 sektörlü olan Ada – 3 için çözüm süreleri saniye (sn.) olarak verilmiştir.

Kış vardiyasında çalışan kontrolörlerin vardiya atamalarından sonra vardiyalardaki çizelge sonuçları Tablo 14’de verilmiştir. Tabloda Ada – 1’de çalışan kontrolörlerin Vardiya – 13’deki çizelgesi görülmektedir. C1 – C11 tecrübeli kontrolör iken C12 – C20 tecrübesiz kontrolörlerdir. Kontrolörler 2’şer saatlik zaman dilimlerinde çalışıp dinlenmektedirler ve 12’şer saatlik vardiyalar 6 periyottan oluşmaktadır. Bu sebeple vardiya 6 tane zaman dilimi olarak gösterilerek kontrolörlerin çalıştıkları zaman dilimleri renkli olarak gösterilmiştir. Hangi rengin hangi sektörü temsil ettiği şekilde verilmiştir.

4.2.2. Aşama – 2 Sonuçları (The Stage-2 Results)

Kış vardiyaları için ekiplerin çalışacakları vardiya atamaları yapıldıktan sonra her bir vardiyadaki kontrolörlerin çizelgelemesi yapılmıştır. Ada – 1, 2 ve 3’de çalışan kontrolörlerin çizelgenmesi sonucunda tüm vardiyalardaki toplam iş yükü değerleri sırasıyla Tablo 11, 12 ve 13’de paylaşılmıştır. Ayrıca tablolarda 5 sektörlü olan Ada – 1 ve 2 için yüzdesel relativegap değerleri ve

Tablo 11. Ada – 1’de çalışan ekiplerin kış vardiyaları iş yükü dağılımları (Winter shift workload distribution of teams working in Island – 1)

v	Toplam İş yükü	Gap_r (%)
1	1076	6
2	1012	6
3	1057	6
4	987	5
5	1056	5
6	1008	5
7	1065	5
8	1023	5
9	1082	4
10	991	4

Tablo 12. Ada – 2’de çalışan ekiplerin kış vardiyaları iş yükü dağılımları (Winter shift workload distribution of teams working in Island – 2)

v	Toplam İş yükü	Gap_r (%)	v	Toplam İş yükü	Gap_r (%)
1	1045	5	11	1032	5
2	946	5	12	1024	5
3	1058	5	13	1051	5
4	995	5	14	1044	5
5	1030	5	15	1015	5
6	998	5	16	992	4
7	1015	5	17	1028	6
8	991	5	18	985	4
9	1027	5	19	1042	5
10	992	5	20	973	5

Tablo 13. Ada – 3’de çalışan ekiplerin kış vardiyaları iş yükü dağılımları ve çözüm süreleri (Winter shifts workload distribution and solution times of teams working in Island – 3)

v	Toplam İş yükü	Çözüm Süresi (sn.)	v	Toplam İş yükü	Çözüm Süresi (sn.)
1	725	18	11	703	46
2	685	24	12	712	72
3	704	22	13	516	32
4	686	34	14	511	58
5	695	16	15	515	18
6	709	44	16	495	12
7	726	72	17	507	76
8	728	92	18	527	32
9	701	88	19	473	26
10	694	28	20	506	16

Tablo 14’de verilen çizelgeye bakıldığında tüm kontrolörlerin 2 saat çalışıp 2 saat dinlenecekleri şekilde görevlendirmelerinin yapıldığı görülmektedir. Kontrolörlerin çoğunluğu iş yükünün dengelenmesi adına vardiyaları boyunca farklı farklı sektörlere atanmışlardır. Yani aynı sektöre vardiya boyunca farklı kontrolörler çizelgelenmiştir. Bunun yanında tecrübesiz kontrolörlerin yanına tecrübeli kontrolörlerin atanması gerekmektedir. Çizelgede C12 – C20’nin görevlendirildiği sektörlere bakıldığında aynı zaman diliminde bu kontrolörlerden herhangi ikisi aynı sektöre atanmadığı görülmektedir. Ayrıca, bu çizelgelemeye göre kontrolörlerin iş yükü dağılımları da tabloda verilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Türkiye’de hem yerel hem de transit uçuşları kapsayan saha kontrol hizmetini veren hava trafik kontrolörlerinin (ATCo) çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Hava sahasının yapısındaki sektörlerde trafik yoğunluğu ve hava koşulları saatlik dilimlere, gece-gündüz saatlerine ve mevsimlere göre değişkenlik göstermektedir. Çalışmada sektörlerdeki tahmini trafik talebi ve hava durumu dikkate alınarak kontrolörlerin iş yükü dağılımını eşitlemek amacıyla iki aşamalı matematiksel model önerilmiştir. İlk aşamada belirli sayıda kişiden oluşan ekiplerin on günlük periyottaki toplam iş yüklerini dengeleyecek şekilde vardiya atamaları yapılmıştır. İkinci aşamada ise her bir vardiyadaki ekiplerin kendi içerisinde iş yüklerini dengeleyecek şekilde kontrolörlerin çizelgelenmesi yapılmıştır. Kontrolörlerin çalışma saatleri, dinlenme saatleri gibi çalışma koşullarının yanında tecrübeli ve tecrübesiz olmaları durumu da dikkate alınmıştır. Kontrolörlerin iş yükleri hava durumu, atandıkları sektörün yoğunluğu ve birlikte çalıştıkları iş arkadaşının tecrübeli olup olmamasına göre değişmektedir. Bu çalışmada da sabit personel sayısına göre kontrolörlerin iş yüklerinin kendi aralarında dengelenmesi amaçlanmıştır. İş yüklerinin birbirine yakın olması personeller arasında adil bir çalışma düzeni sağlayacaktır. Bu şekilde çalışanların iş yerine ve çalışma arkadaşlarına güveni artacak ve daha sağlıklı bir çalışma ortamı ortaya çıkacaktır.

Tablo 14. Ada – 1’de çalışan kontrolörlerin kış vardiyası Var – 13’deki çizelgesi (Schedule on winter Shift-13 of controllers working on Island-1)

	Periyot 1	Periyot 2	Periyot 3	Periyot 4	Periyot 5	Periyot 6	İş yükü	Sektör
C1		Green		Yellow		Red	73	1-2 L/U
C2	Blue		Red		Blue		128	3-4 L/U
C3		Green		Red		Blue	102	10-11 L/U
C4	Red		Blue		Red		91	12 L/U
C5	Yellow		Orange		Green		102	13 L/U
C6		Red		Green		Orange	89	
C7	Green		Yellow		Yellow		76	
C8		Orange		Green		Yellow	101	
C9		Blue		Orange		Orange	157	
C10		Yellow		Blue		Green	105	
C11	Orange		Green		Orange		131	
C12	Blue		Green		Blue		120	
C13		Yellow		Blue		Yellow	110	
C14		Blue		Yellow		Red	105	
C15		Orange		Red		Green	87	
C16	Green		Orange		Green		85	
C17	Yellow		Blue		Orange		121	
C18		Red		Orange		Blue	121	
C19	Red		Red		Yellow		64	
C20	Orange		Yellow		Red		93	

Geliştirilen matematiksel modelin test edilirken Aşama – 1’de çok kısa sürelerde en iyi çözümlere ulaşılmıştır. Aşama – 2’de ise 3 sektör için yine çok kısa sürelerde en iyi çözümlere ulaşılırken sektör sayısının 5’e çıkması durumunda arzu edilen sürelerde en iyi çözümlere ulaşılammıştır. Bu sebeple iterasyon sayısı durdurma koşulu olarak belirlenmiştir. Bu durumda elde edilen çözümler ve eldeki en iyi çözümün en iyi alt sınır değerine uzaklığı olan bilgisini veren “RelativeGap” değerleri paylaşılmıştır. Aşama – 1 sonuçlarına bakıldığında atandıkları vardiyalara göre ekiplerin toplam iş yükleri oldukça birbirine yakındır. Aşama – 2’de de kontrolörlerin iş yükü dağılımları birbirine yakın olacak şekilde çizelge sonuçları elde edilmiştir.

Bundan sonraki zamanda yönetici ve planlayıcı kontrolörlerin yanında destekleyici kontrolörlerin de olduğu çizelgelerin elde edileceği bir çalışma planlanmaktadır. Destekleyici kontrolörler ile kontrolörlerin haftalık doldurması gereken çalışma saatleri de dikkate alınabilir. Ayrıca OJT eğitimi veren kontrolörlerin eğitim vereceği saatler dikkate alınarak çizelge yapılması da planlanmaktadır. Yani genel olarak kontrolörlerin ulaşılabilir olduğu saatler ve haftalık doldurması gereken çalışma

saatleri de dikkate alınacaktır diyebiliriz. Bu durumda kontrolörlerin izinli olduğu zamanlar da dikkate alınabilir.

Sektör sayısının 5 olduğu durumlarda çözüm süresi artmaktadır ve kabul edilebilir sürelerde eniyi çözüme ulaşılammaktadır. Farklı personellerin de dahil edildiği modellerde de kesin çözüm yöntemleri ile eniyi çözümlerin elde edilemeyeceği öngörülmektedir. Bu nedenle bu problemin çözümü için sezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma sürecinde kontrolörlerin çalışma düzenleri hakkında bize bilgiler aktaran sayın Saner Sabahcı’ya teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Zekeriya KAPLAN: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Büşra TUTUMLU: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

İlknur TÜKENMEZ: Deneyleeri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] The World Bank. (December 20, 2020). Air transport, registered carrier departures worldwide.
- [2] Mulder, M. (2010). Air Traffic Control. Sciyo: Croatia.
- [3] Repetti, R. L. (1993). Short-term effects of occupational stressors on daily mood and health complaints. *Health Psychology*, 12, 126–131.
- [4] ICAO-Doc 4444. (2016). Procedures for Air Navigations Services - Air Traffic Management. 16th edition. Montréal, Canada.
- [5] Koçtepe, S., Bedir, N., Eren, T. ve Gür, Ş. (2018). Organizasyon Görevlileri İçin Personel Çizelgeleme Probleminin 0-1 Tam Sayılı Programlama İle Çözümü. *Ekonomi İşletme ve Yönetim Dergisi*, 2 (1), 25-46.
- [6] Eren, T., Özder, E. H. ve Varlı, E. (2017). Hedef Programlama Yaklaşımı İle Temizlik Personeli Çizelgeleme Problemi İçin Bir Model Önerisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 114-127.
- [7] Azaiez, M. N. ve Al Sharif, S. S. (2005). A 0-1 goal programming model for nurse scheduling. *Computers & Operations Research*, 32(3), 491-507.
- [8] Bağ, N., Özdemir, M. ve Eren, T. (2012). 0-1 Hedef Programlama ve ANP Yöntemi ile Hemşire Çizelgeleme Problemi Çözümü. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 4(1), 2-6.
- [9] Özcan, E. C., Varlı, E. ve Eren, T. (2017). Hedef Programlama Yaklaşımı ile Hidroelektrik Santrallarda Vardiya Personeli Çizelgeleme. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(4), 363-370.
- [10] Demirel, B., Yelek A., Alakaş H. M. ve Eren, T. (2018). ANKARAY Güvenlik Personelinin Vardiya Çizelgeleme Probleminin Hedef Programlama Yöntemi ile Çözümü. *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, 18(2), 1-17.
- [11] Aykin, T. (1996). Optimal Shift Scheduling with Multiple Break Windows. *Management Science* 42(4):591-602.
- [12] Conniss, R., Curtois, T., Petrovic, S. ve Burke, E. (2014). Scheduling air traffic controllers. 10th International Conference Practice and Theory Automated Timetabling, August 26-29, York, UK, 465-466.
- [13] Tello, F., Mateos, A., Jiménez-Martín, A. ve Fernández del Pozo, J.A. (2017) ATC work shift scheduling using multistart simulated annealing and regular expressions. *International Conference Decision Support Systems Technology; IEEE Xplore: Thessaloniki, Greece*, 169–175.
- [14] Tello, F., Mateos, A., Jiménez-Martín, A. ve Suárez, A. (2018). The air traffic controller work-shift scheduling problem in Spain from a multiobjective perspective: A metaheuristic and regular expression-based approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 15.
- [15] Jiménez-Martín, A., Tello, F. ve Mateos, A. (2020). The ATCo work shift scheduling problem dealing with incidents in a tactical phase. 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 385-390.
- [16] Wang, T. C. ve Ke, G. C. (2013). Fatigue minimization work shift scheduling for air traffic controllers. *International Journal of Automation and Smart Technology*, 3(2), 91-99.
- [17] Josefsson, B., Polishchuk, T., Polishchuk, V. & Schmidt, C. (2017). Scheduling air traffic controllers at the remote tower center. 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 1-10.
- [18] Hernandez-Romero, E., Josefsson, B., Lemetti, A., Polishchuk, T. ve Schmidt, C., (2022). Integrating weather impact in air traffic controller shift scheduling in remote and

- conventional towers. Euro Journal On Transportation And Logistics, 11.
- [19] Dönmez, K., Demirel, S. ve Özdemir, M. (2020) Handling the Pseudo Pilot Assignment Problem in Air Traffic Control Training by Using NASA TLX. Journal of Air Transport Management, vol. 89, pp. 101934.
- [20] DHMI - Devlet Hava Meydanları İşletmesi. (2021). Aeronautical Information Publication Turkey.
- [21] DHMI - Devlet Hava Meydanları İşletmesi (19 Haziran, 2022). İstatistikler.
- [22] Flightradar24. (2022). Flightradar24 Live Air Traffic.
- [23] GAMS Destek. (2015).

Nozul Soğutma Sisteminde Verimliliğin Arttırılmasına Yönelik Bir Araştırma

Mustafa AKTAŞ¹  Zafer DENİZ²  Yaren GÜVEN^{1*}  Veysel DURAK³  Merve ULULAR³  Deniz GÖKBEN³ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Erkunt Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başyuru: 18/05/2023
Düzeltilme: 29/05/2023
Kabul: 31/05/2023

Anahtar Kelimeler

Döküm
Maça Üretimi
Nozul
Soğutma Sistemi
Maça Sandığı

Article Info

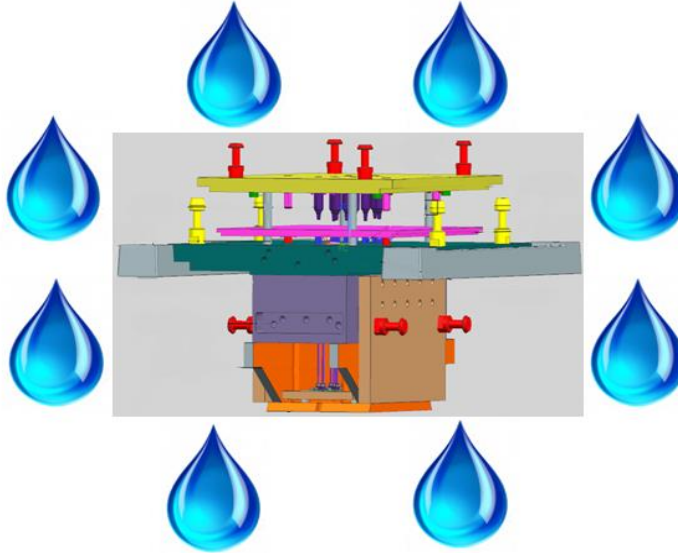
Research article
Received: 18/05/2023
Revision: 29/05/2023
Accepted: 31/05/2023

Keywords

Casting
Core Production
Nozzle
Refrigeration System
Core Box

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Nozul soğutulması için kullanılan kapalı çevrim su sirkülasyon sistemi ve verimlilik sağlayan mekanik buhar sıkıştırma soğutma sistemi tasarlanarak analiz edilmiştir. / The closed loop water circulation system used for nozzle refrigerating and the mechanical vapor compression refrigeration system providing efficiency were designed and analyzed.



Şekil A: Çalışmanın şematik özeti / **Figure A:** Schematic summary of the study

Önemli noktalar (Highlights)

- Su kullanımında verimlilik sağlayan bir eko tasarım yapılmıştır. / An eco-design that ensures efficiency in water use.
- Üretimde verimlilik sağlayan bir nozul soğutma sistemi geliştirilmiştir. / A nozzle refrigerating system has been developed that ensures efficiency in production.
- Yaz ve kış şartlarında oluşan su sıcaklık değişiminin önüne geçilmiştir. / Water temperature change in summer and winter conditions was prevented.

Amaç (Aim): Soğutma sisteminde su israfının önlenmesi ve maddi tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. / It was aimed to prevent wastage of water and to provide financial savings in the refrigeration system.

Özgünlük (Originality): Kapalı çevrim su sirkülasyonuna sahip buyeni soğutma sistemi ile döküm sektöründe su verimliliği sağlanmıştır. / With this new refrigeration system with closed loop water circulation, water efficiency has been achieved in the casting industry.

Bulgular (Results): Maça sandıklarında kullanılan kumun nozul içerisinde ve ucunda katılaşmasının önüne geçilmiş ve üretimdeki aksaklıklar azaltılmıştır. / The solidification of the sand used in the core boxes in the nozzle and at its tip has been prevented and the problems in production have been reduced.

Sonuç (Conclusion): 1 maça sandığında 13.851 m³/yıl su tasarrufu sağlanarak yıllık 51.935,77 TL kazanç sağlanmıştır. / 13,851 m³/year of water saving was achieved in 1 core box, resulting in an annual gain of 51,935.77 TL.



Nozul Soğutma Sisteminde Verimliliğin Arttırılmasına Yönelik Bir Araştırma

Mustafa AKTAŞ¹ Zafer DENİZ² Yaren GÜVEN^{1*} Veysel DURAK³ Merve ULULAR³ Deniz GÖKBEN³

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Erkunt Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2023
Düzelme: 29/05/2023
Kabul: 31/05/2023

Anahtar Kelimeler

Döküm
Maça Üretimi
Nozul
Soğutma Sistemi
Maça Sandığı

Özet

Endüstri tarihinin en eskilerinden biri olan döküm, kum kalıplama ve metal ergitme olarak iki ana prosedürden oluşur. Döküm işlemi temel olarak sıvı metalin nihai parça için istenen geometride boşluk içeren bir kalıba dökülmesinden meydana gelir. Maça, parçanın içerisindeki boşlukları oluşturan kalıbın bir kısmı veya dökümün içinden geçen delik olarak tanımlanır. Mikserde asit ve reçine ile kurlaşan kum, maça makinesindeki kum haznesine alınarak 2-6 bar arası hava basıncında nozullar aracılığı ile sandık içerisine püskürtülür. Sandık içerisindeki maça pişirme işlemi esnasında nozul ve çevresinin etkin soğutulmaması, nozullardan püskürtülen kumun katılaşma tıkanmasına sebep olur. Oluşan bu tıkanma sonucunda kesitin daralması ile kum akışı bozulmakta ve verimlilik azalarak üretim kalitesine olumsuz yönde etkilenmektedir. Mevcut sistemde maça sandıklarındaki nozulların soğutulması için şebeke suyu kullanılmakta olup, kullanılan su soğutma işleminden sonra 35°C kadar ısınıp rögara atık su olarak aktarılmaktadır. Yaz aylarında yükselen su sıcaklığı ile nozul uçlarındaki artan tıkanmalar sonucunda soğutma sistemi için daha fazla su kullanılmakta, bu da su israfına ve maliyet artışına sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, kapalı çevrim su sirkülasyon sistemi ve R134a soğutucu akışkanlı mekanik buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi tasarlanarak tasarım analiz edilmiştir. Bu yeni tasarım ile bir maça sandığında 13.851 m³/yıl su tasarrufu ve yıllık 51.935,77 TL kazanç sağlanarak, bu kapsamda su israfının azaltılmasına yönelik yeni bir metot ortaya konmuştur.

A Research on Increasing Efficiency in Nozzle Refrigeration System

Article Info

Research article
Received: 18/05/2023
Revision: 29/05/2023
Accepted: 31/05/2023

Keywords

Casting
Core Production
Nozzle
Refrigeration System
Core Box

Abstarct

Casting, one of the oldest in industrial history, consist of two main procedures, sand molding and metal melting. The casting process basically consist of casting the liquid metal into a mold with a cavity in the desired geometry for the final component. The core is defined as the part of the mold that creates the cavities in the part or the hole that goes through the casting. The sand, which is cured with acid and resin in the mixer, is taken into the sand chamber in the core machine and sprayed into the crate through nozzles at an air pressure of 2-6 bar. The ineffective cooling of the nozzle and its surroundings during the core cooking process in the crate, causes the sand sprayed from the nozzles to solidify and blockage. As a result of this blockage, with the narrowing of the section, the sand flow is disrupted and the productivity decreases, negatively affecting the production quality. Mains water is used in the existing system to cool the nozzles in the core crates and after the cooling process the water used is heated up to 35°C and transferred to the manhole as waste water. As a result of the rising water temperature in the summer months and the increasing blockages at the nozzle tips, more water is used for the cooling system, which leads to water waste and increased costs. In this study, closed loop water circulation system and mechanical vapor compression refrigeration system with R134a refrigerant were designed and analyzed. With this new design, a water saving of 13.851 m³/year and an annual saving of 51.935.77 TL was achieved in a core box, and a new method was put forth to reduce water waste in this context.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Döküm işlemi, üretilmek istenen parçanın şekline ait boşluk bulunan kalıplara pik, çelik, yolluk hammaddeleri ve alaşım elementlerinin ark,

endüksiyon ya da kupol ocaklarında ergitilmiş metalin dökülmesi ile gerçekleştirilir [1].

Döküm sürecinde maçalar parça içerisinde istenilen boş yapının oluşturulması amacı ile

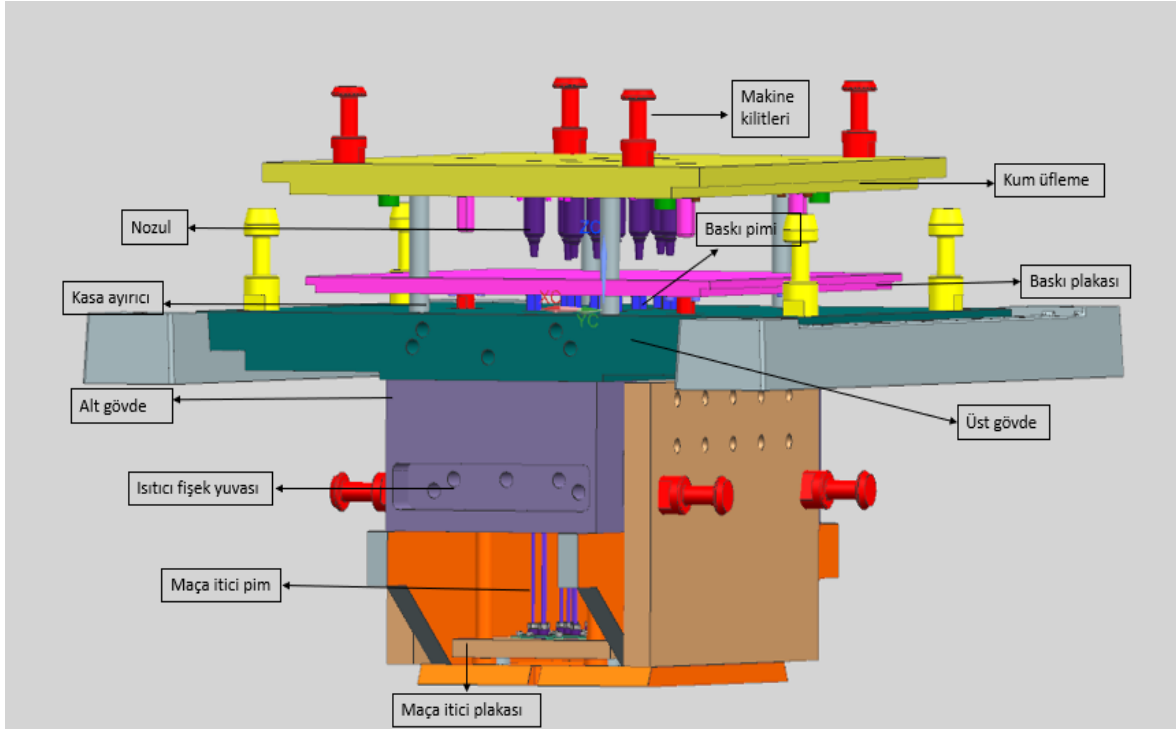
kullanılır. Örneğin motor bloğunun su ceketi, silindir kafaları ve valfler gibi içi boş bir dökümün iç geometrik formunu oluşturur [2]. Ortalama 1500°C sıcaklıktaki ergimiş metal ile temas edecek ve metalin katılaşması ile döküm parçanın iç boşluklarını oluşturacak maçanın, bu yüksek sıcaklık ve yüksek hidrostatik basınç altında katılaşma bitinceye kadar dağılmayacak özellikte imal edilmesi gerekir. Maça kumu, reçineler (bağlayıcılar) ile karıştırılarak pişirilir ve ardından katalizör gaz ile sertleştirilerek dökümde kullanılmak üzere kalıba yerleştirilir [3].

Maça üretimi için Furan yöntemi, cold-box yöntemi, hot-box yöntemi, pep-set yöntemi ve CO₂ yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılır [4]. Hot-box yönteminde kum, reçine ve sertleştirici uygun mikserde karıştırılıp 150-250°C'de pişirilir. Hot-box yöntemi diğer yöntemlere göre daha azzamanda pişirme süresi ile daha fazla miktarda

maça ürettiği için büyük ölçekli seri üretimlerde tercih edilir [5].

Üst plaka, alt plaka ve ısıtıcıdan oluşan hot-box sandıklarında kullanılan nozullar akışkan tipine ve püskürtme alanlarına göre sınıflandırılır. Akışkan tipine göre nozullar 5 farklı uygulama alanına sahiptir. Bunlar hidrolik nozullar, pnömatik nozullar, hava nozulları, noktasal püskürtme nozullar ve sis nozulları olarak sınıflandırılabilirler. Püskürtme parametreleri ise püskürtme etkisi, kapasitesi, modeli ve püskürtme dağılımı gibi değişkenlerden oluşur [6].

Şekil 1'de hot-box maça sandığınınayrıntısı verilmiştir.



Şekil 1. Hot-box maça sandığı (Hot-box core crate)

Pourfattah ve Sabpooshani [7], nozul soğutma sistemi performansı üzerine yaptıkları çalışmalar sonucunda nozullardaki ısı transferinin nozul çapına, yoğunluğuna, debisine ve soğutucu sıvının çarpma hızına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca akış hızının artması ile sıvının soğutma kapasitesinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Döküm prosesinde nozulların tasarımları, boyutu, bağlantı noktası ve kalınlığı incelendiğinde farklı konfigürasyonların malzeme akışını değiştirdiği belirtilmiştir [8].

Wang vd [9] kömür tüketimini azaltmak, CO₂ emisyonlarını azaltmak ve termik santrallerin ekonomik durumlarını iyileştirmek amacıyla yeni bir hava/su hibrit soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Sonuçlar, bu sistem ile santralde yıllık kömür tüketiminin yaklaşık 1.400 ton, CO₂ emisyonununun 3.490 ton azaltılabileceğini ve 50.000 ton su tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir.

Aili vd [10] termik santrallerde evaporatif ıslak soğutmalı ve soğutmasız gündüz-gece ışınımlı gökyüzü soğutmasının su tasarrufu potansiyelini incelemişlerdir. Hibrit bir evaporatif-radyatif

soğutma sisteminin ABD'nin kuru ve sıcak bölgelerinde %30-60, diğer bölgelerinde ise %50-90 oranında yıllık su tasarrufu sağladığını gözlemlemiştir.

Tsafarasvd [11] kurak bölgelerdeki evaporatif soğutmalı seraların tasarımını değiştirmenin su tasarrufu potansiyelini araştırmışlardır. Değiştirilmiş sera tasarımı, evaporatif soğutmada %40'tan fazla su tasarrufu sağlamıştır.

Hot-box sandıkları, maça kumunun pişme sıcaklığına kadar ısıtılır. Kum püskürtme başlığından maça sandığına kum doldurulur ve maçanın pişme zamanına kadar beklenir. Bu bekleme süresinde nozullardan gelen kum, nozul ve çevresinin etkin soğutulmaması durumunda katılaşabilir ve kesitin daralması ile akış yapısı bozulabilir. Oluşan katılaşma nozul/nozullardan kum akışını durdurmakta veya azaltarak istenilen kalitede üretim yapılamamasına, üretimin kesintiye uğramasına sebebiyet verebilir. Soğutucu sıvı akış yapısı ile soğutucu sıvı, nozul ucuna kadar yönlendirilerek özellikle nozul ucu tıkanmalarının önüne geçilir ve böylece döküm teknolojisinde üretimde verimlilik sağlanır.

Bu çalışma ile sıcak maça üretim makinalarında kullanılan su tüketiminde verimlilik sağlanması ve maça sandıklarında kum üfleme amacı ile kullanılan nozulların gövde ve ucunda katılaşmanın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Verimlilik sağlanması amacıyla yapılan tasarımın, maça üretim makinaları ve sandıkları üzerine çalışma yapan araştırmacılara ışık tutması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Teorik Analiz (Theoretical Analysis)

Mekanik buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde çalışan kompresörün izantropik verimi;

$$\eta_{iz} = 1 - 0,05 \frac{P_C}{P_E} \quad (1)$$

kompresör gücü ise;

$$\dot{W}_K = \dot{m} (h_2 - h_{1r}) \quad (2)$$

bağıntıları ile hesaplanır [12].

Kullanılan R134a soğutucu akışkanın debisi;

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_E}{(h_1 - h_4)} \quad (3)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Evaporatörde soğutma suyundan çekilen ısı;

$$\dot{Q}_E = \dot{m} c \Delta T \quad (4)$$

bağıntısından, kondenserden atılan ısı ise;

$$\dot{Q}_C = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (5)$$

bağıntısından bulunur [12]. Bu durumda ısı pompasının etkinlik katsayısı;

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_K} \quad (6)$$

bağıntısı, soğutma makinesinin etkinlik katsayısı ise;

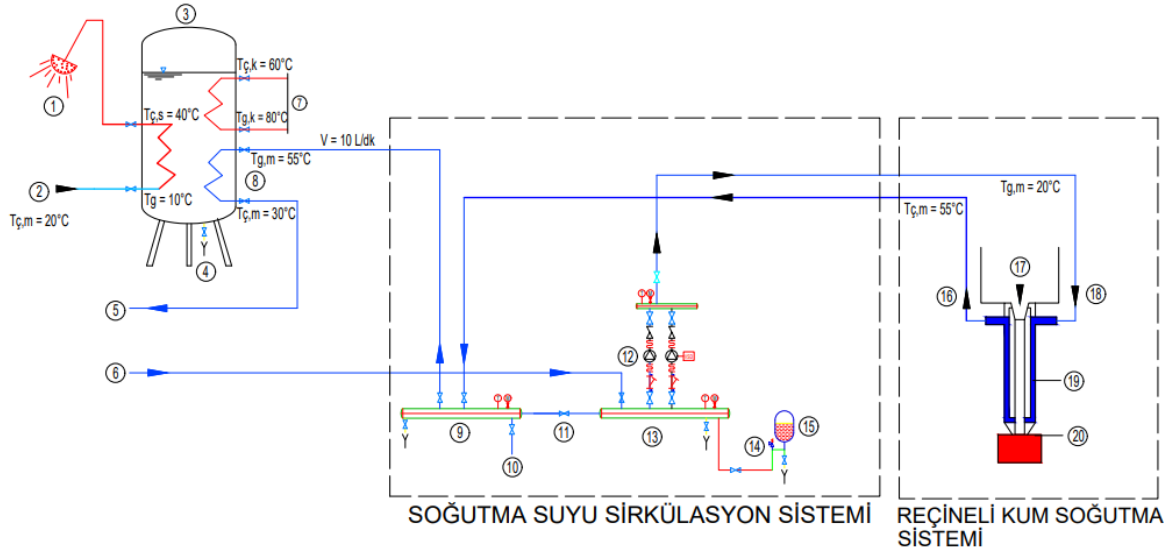
$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_K} \quad (7)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır [13].

2.2. Tasarım (Design)

Sistemde mevcutta kullanılan maça sandığı nozul sisteminin soğutulması için şebeke suyu kullanılmakta ve kullanılan su 20°C'de sisteme girip, reçineli kum aktaran nozulları soğutmada kullanıldıktan sonra 55°C'ye kadar ısınmaktadır. Elde edilen sıcak su, sıcak su hazırlama sisteminin ön ısıtmasında kullanılmak üzere boyler sistemine gönderilmektedir. Boyler sisteminde bir miktar daha ısıyı çekilen soğutma suyu yağmur suyu rögarına atılmaktadır. Maça sisteminde nozullar günlük 9 saat çalışmakta olup sistemde kullanılan suyun debisi deneysel olarak 10 L/dakika olarak ölçülmüştür.

Mevcut sistem su akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

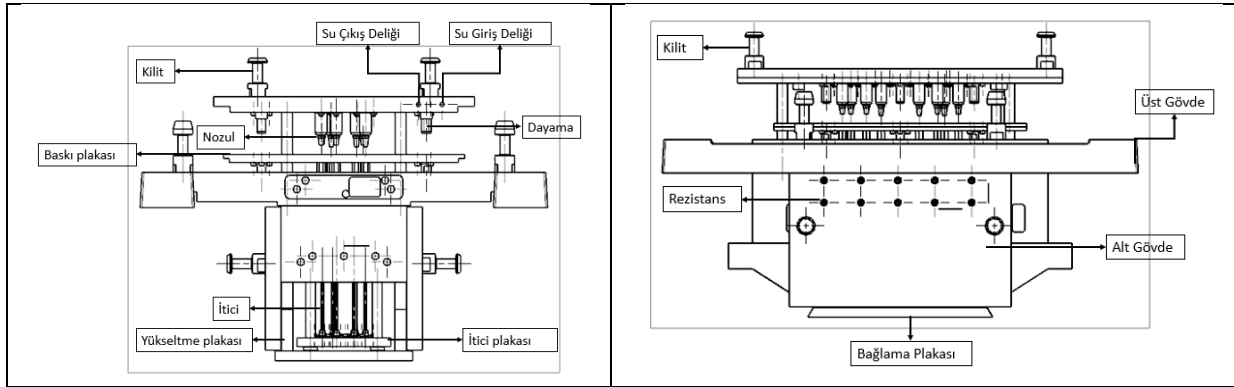


- | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ① DUŞ SİSTEMİ | ⑥ ŞEBEKE SOĞUK SU HATTI | ⑪ BAYPASS VANASI | ⑯ SICAK SU ÇIKIŞI |
| ② SOĞUK SU HATTI | ⑦ KAZAN BOYLER ISITMA POMPASINDAN | ⑫ SİRKÜLASYON POMPASI | ⑰ REÇİNELİ KUM GİRİŞİ |
| ③ SOYUNMA ODALARI SICAK SU BOYLER | ⑧ KULLANIM SICAK SUYU ISITMA YÜKÜ | ⑬ BASMA KOLEKTÖRÜ | ⑱ SOĞUK SU GİRİŞİ |
| ④ BOŞALTIMA | ⑨ DÖNÜŞ KOLEKTÖRÜ | ⑭ EMNİYET VENTİLİ | ⑳ SICAK ÜST PLAKA |
| ⑤ ATIK SU HATTI | ⑩ ŞEBEKE DOLDURMA | ⑮ BÜZÜŞME TANKI | |

MEVCUT SİSTEM

Şekil 2. Üretim tesisinde kullanılan mevcut soğutma sistemi akış şeması (Flow schema of the current refrigeration system used in the production facility)

Sistem sıcak sandık yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Sıcak sandık yapısı (Hot-box structure)

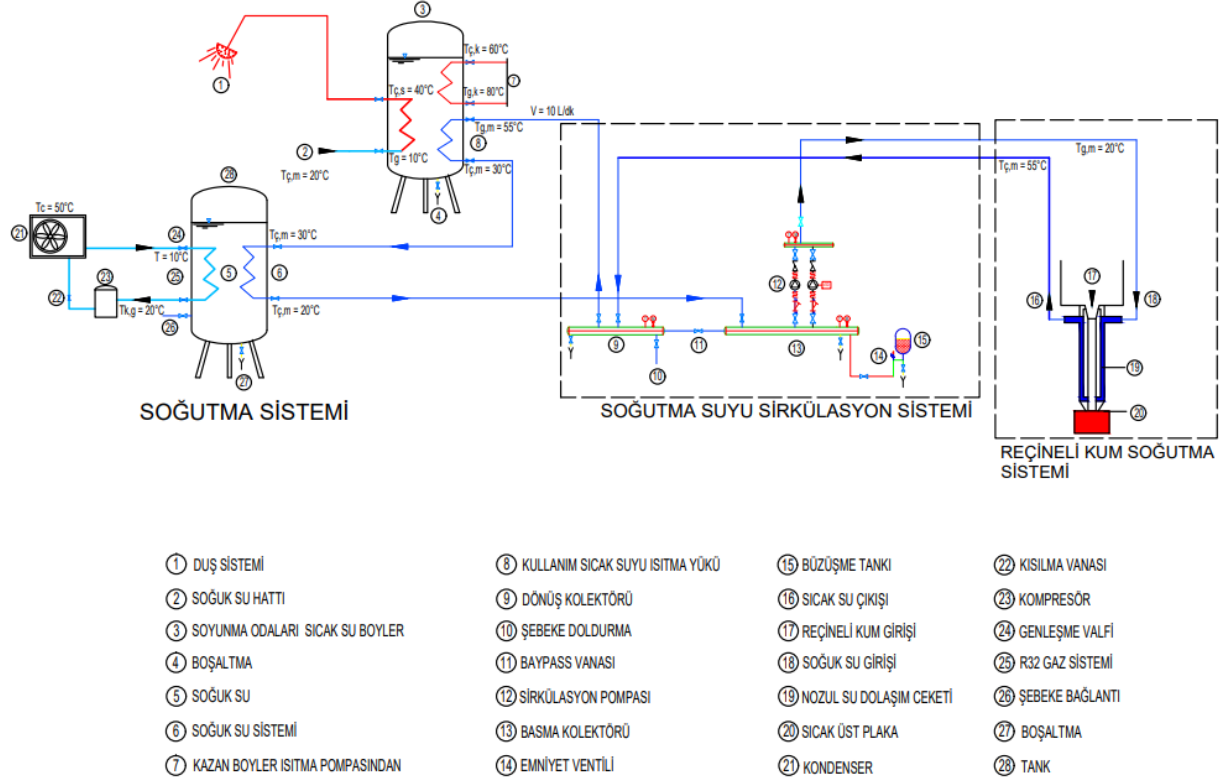
Mevcut sistemde yaz ve kış aylarında şebeke suyunda sıcaklık farklılıklarının olması yaz aylarında su sıcaklığının yükselmesinden dolayı maça soğutma sistemi için daha fazla suya ihtiyaç duyulması ve kullanılan suyun da enerjisinin bir kısmı kullanıldıktan sonra atık su olarak atılmasından dolayı mevcut sistemde su ve sermaye israfı meydana gelmektedir. Yılda 285 gün çalışan bu sistemde günde $5,4 \text{ m}^3$ su harcandığı hesaplanmış ve sanayide kullanılan suyun birim fiyatının $39,41 \text{ TL/m}^3$ olduğu göz önüne alındığında [14] yılda; $5,4 \text{ m}^3/\text{gün} \times 285$

$\text{gün/yıl} \times 39,41 \text{ TL/m}^3 = 60.652 \text{ TL}$ suya para harcanmaktadır. Su israfının önüne geçmek ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla yeni bir sistem tasarlanmıştır.

Yapılan analizler neticesinde su kullanımında verimliliği sağlamak amacıyla Şekil 4'te verilen yeni sistem tasarlanmıştır. Mevcut sistemde su sıcaklığının mevsimlere göre değişiklik göstermesi ve yüksek sıcaklıklarda nozul ucundaki bölgelerde kum katılaşmasının oluşması sistemin durmasına ve temizlik işlemlerinden sonra tekrar devam

ettirilmesine neden olmaktadır. Tıkanma sorunu günlük üretimi de etkilemektedir. Kumun katılaşmasının önüne geçmek için su sıcaklığının belirli değerlerin altında olması gereklidir. Mevcut sistemde yaşanan aksaklıkların giderilmesi ve su israfının azaltılması için kapalı çevrim su sirkülasyon sistemi ve R134a soğutucu akışkanının

kullanıldığı su soğutma sistemleri entegre edilmiştir. Bu iki sistemin ilavesi ile su israfı azaltılmış, su dışarı atılmadan filtre edilerek maça kum nozullarının soğutulması amaçlanmıştır. Bu sayede mevsimlere göre soğutma sıcaklığında oluşan sıcaklık değişimlerinin önüne geçilmiştir.



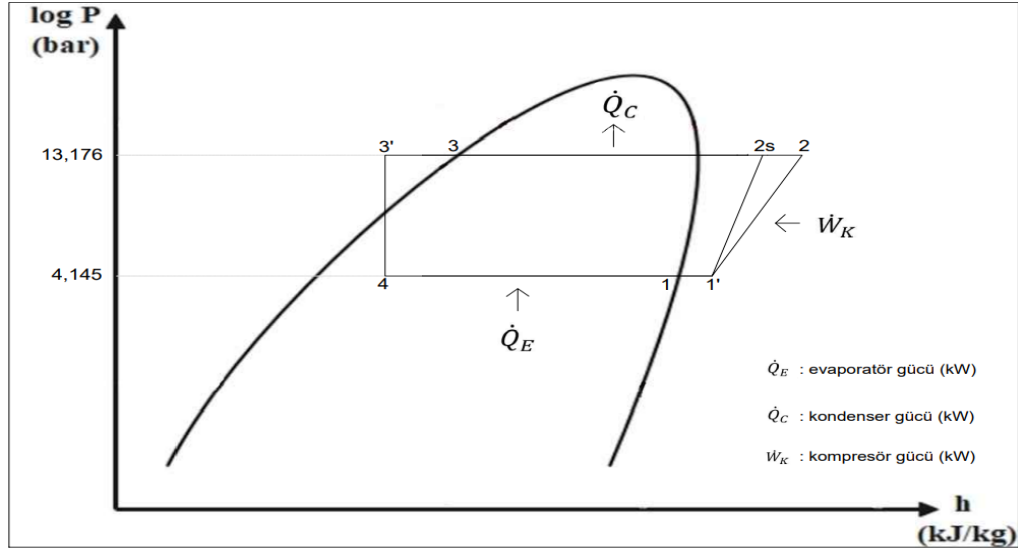
SOĞUTMA SİSTEM ŞEMASI

Şekil 4. Yenilikçi su soğutma sistemi akış şeması (Innovative water refrigeration system flow schema)

Soğutma sisteminde kullanılan su 55°C'ye kadar ısınmakta daha sonra suyun ısıısının bir kısmı duş boylerinde birinci serpantine girmekte ve ısı geri kazanımı ile soğutma sistemine girmeden önce sıcaklığı 20°C'ye kadar sıcaklığı düşürülmektedir.

Boylere 10°C'de giren su, 40°C olarak çıkmaktadır.

Şekil 5'te soğutma sistemine ait logP-h diyagramı görülmektedir.



Şekil 5. R134a logP- h diyagramı (R134a logP-h diagram)

Bu sistemde elektrik harcayan ekipman kompresör olup nozullar günde 9 saat soğutulmaktadır. Bu da $1,335221 \text{ kW} \times 9 \text{ saat/gün} = 12,01699 \text{ kWh/gün}$ elektrik tüketilecektir.

Yapılan hesaplamalarda kullanılan değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hesaplamalarda kullanılan değerler (Values used in calculations)

Parametre	Değer
Nozulların günlük çalışma süresi (saat)	9
Kullanılan suyun debisi (L/dakika)	10
Suyun özgül ısısı (kJ/kgK)	4,18
Soğuk su giriş sıcaklığı (°C)	20
Sıcak su çıkış sıcaklığı (°C)	55
Boylere giren su sıcaklığı (°C)	10
Boylere çıkan su sıcaklığı (°C)	40
Kondenzasyon sıcaklığı (K)	323,15
Evaporasyon sıcaklığı (K)	283,15
Aşırı soğutma (K)	10
Aşırı kızdırma (K)	10
h_1 (kJ/kgK)	412,558
h_2 (kJ/kgK)	442,533
$h_3 = h_4$ (kJ/kgK)	256,16
Kondenzasyon basıncı (bar)	13,176
Evaporasyon basıncı (bar)	4,145
Sistemin yıllık çalışma süresi (gün)	285
Sanayi su birim fiyatı (TL/m ³)	39,41
Sanayi elektrik birim fiyatı (TL/kWh)	2,545
Tank su giriş sıcaklığı (°C)	30
Tanksu çıkış sıcaklığı (°C)	20

Yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sonuçlar (Results)

Parametre	Değer
Günlük tüketilen su miktarı (m ³ /gün)	5,4
Suyun debisi (kg/s)	0,166667
Nozullarda ısınan sudan çekilen ısı (kW)	24,38333
Evaporatörde soğutma suyundan çekilen ısı (kW)	6,966667
Soğutucu akışkanın kütleli debisi (kg/s)	0,044544
İzantropik verim	0,841062
Kondenserden atılan ısı (kW)	8,301887
Kompresör gücü (kW)	1,335221
COP ısı pompası	6,217615
COP soğutma makinesi	5,217615
Yıllık su gider maliyeti (TL)	60651,99
Günlük elektrik tüketimi (kWh/gün)	12,01699
Yıllık elektrik maliyeti (TL)	8716,22
Maliyet tasarrufu (TL)	51935,77

Sanayide kullanılan elektriğin birim fiyatı 2,545 TL/kWh olarak kabul edildiğinde [15]; 12,01699 kWh/gün x 285 gün/yıl x 2,545 TL/kWh = 8.716,22 TL/yıl maliyet oluşmaktadır. Mevcut sistemde yıllık 60.652 TL su maliyeti bulunmaktadır. Yeni sistemde ise yıllık elektrik maliyeti 8.716,22 TL'dir. Mevcut sistemden soğutma entegreli sisteme geçildiği takdirde yıllık 51.935,77 TL tasarruf edilmesi mümkündür.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada döküm sektöründe su tüketiminde verimlilik sağlayacak yeni bir eko tasarım yapılmış ve bu tasarım analiz edilmiştir. Yeni tasarım ile elektrik enerjisi maliyeti 8.716,22 TL ve yıllık su maliyeti de 60.652 TL olup, yıllık 51.935,77 TL kazanç sağlanacaktır. Bu sayede hem su israfı ortadan kalkmış hem maliyet azaltılarak hem de yaz ve kış ayları şartlarında oluşan su sıcaklık değişiminin önüne geçilmiştir. Soğutma su sıcaklığının stabil olduğu bu yeni sistem ile maça sandıklarında kullanılan kumun nozul içerisinde ve ucunda katılaşmasının da önüne geçilerek üretimde olabilecek aksamalar da azaltılabilecektir. Böylece işletmede de verimlilik sağlanacaktır. Bu tasarım ile bir maça sandığında 13.851 m³/yıl su tasarrufu sağlanabilecektir.

Bu tasarımda soğutma sistemine dış hava ile kış aylarında suyun soğutulmasını sağlayabilecek bir harici dış ısı değiştirici ve fan entegre edilerek kullanıldığında kış aylarında soğuk dış hava kullanılarak su soğutulabilecek ve soğutma

sisteminin çalışma süresi azaltılarak elektrik enerjisi maliyeti de düşürülebilecektir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

c	Özgül ısı, kJ/kgK
COP_{IP}	Isı pompasının etkinlik katsayısı
COP_{SM}	Soğutma makinesinin etkinlik katsayısı
h	Entalpi, kJ/kg
h_1'	Soğutucu akışkanın kompresöre giriş entalpisi, kJ/kg
h_2	Soğutucu akışkanın kompresörden çıkış entalpisi, kJ/kg
h_3	Soğutucu akışkanın kondenserden çıkış entalpisi, kJ/kg
h_4	Soğutucu akışkanın evaporatöre giriş entalpisi, kJ/kg
\dot{m}	Kütleli debi, kg/s
\dot{Q}_C	Kondenser gücü, kW
\dot{Q}_E	Evaporatör gücü, kW
P_C	Kondenzasyon basıncı, bar
P_E	Buharlaştırma basıncı, bar

\dot{W}_K Kompresör gücü, kW
 η_{iz} Kompresörün izantropik verimi, %

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmaya vermiş olduğu katkılardan dolayı Erkunt Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The 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)

Mustafa AKTAŞ: Yenilikçi soğutma sisteminin tasarımını ve hesaplamalarını yapmış, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He made the design and calculations of the innovative refrigeration system and performed the writing process.

Zafer DENİZ: Yenilikçi soğutma sisteminin tasarımını ve hesaplamalarını yapmış, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He made the design and calculations of the innovative refrigeration system and performed the writing process.

Yaren GÜVEN: Yenilikçi soğutma sisteminin tasarımını ve hesaplamalarını yapmış, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She made the design and calculations of the innovative refrigeration system and performed the writing process.

Vesysel DURAK: Deneysel çalışmayı gerçekleştirmiş, tasarımı ve literatür taramasını yapmıştır.

He conducted the experiments, made the design and literature review.

Merve ULULAR: Deneysel çalışmayı gerçekleştirmiş, tasarımı ve literatür taramasını yapmıştır.

She conducted the experiments, made the design and literature review.

Deniz GÖKBEN: Deneysel çalışmayı gerçekleştirmiş, tasarımı ve literatür taramasını yapmıştır.

She conducted the experiments, made the design and literature review.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Treyger, A. (2018). Overview of Foundry Processes and Technologies: Manufacturing Metal Casting, Continuing Education and Development, Inc. 9 Greyridge Farm Court Stony Point, NY 10980.
- [2] TÜDOKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (2019). Kullanılmış Döküm Kumunun Değerlendirilmesi ve Geri Kazanımı, 2-6.
- [3] Deore, S. D., Chaudhari, G. B., Chaturvedi, A. G., Gunjal, S. U. (2015). A Study Core and Its Types for Casting Process. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3, 1571-1580.
- [4] Öztürk, S. (2018). *Döküm Teknolojileri Ders Notları*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
- [5] The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1987). Preventing Visual Disorders and Acute Physical Discomfort Due to Dimethylethylamine (DMEA) Exposure, 88-103.
- [6] Son, M. (2021). *Farklı Feometrilere Sahip Nozulların Akış Parametrelerinin Sayısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [7] Pourfattah, F., Sabpooshani, M. (2020). Thermal Management of a Power Electronic Module Employing a Novel Multi-Micro Nozzle Liquid-Based Cooling System: A Numerical Study. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 147, 118928.

- [8] Mahmoudi, J. (2022). Numerical Simulation of the Nozzle Configuration in Strip Casting Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 561-578.
- [9] Wang, J., Xue, K., Zhang, G., Chen, W., Li, G., Zhang, J., Zhang, G. (2022). Development and Assessment of a Novel Air/Water Hybrid Cooling System Coupling Two Units for Energy and Water Saving. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102330.
- [10] Aili, A., Zhao, D., Tan, G., Yin, X., Yang, R. (2021). Reduction of Water Consumption in Thermal Power Plants with Radiative Sky Cooling. *Applied Energy*, 302, 117515.
- [11] Tsafaras, I., Campen, J. B., Stanghellini, C., de Zwart, H. F., Voogt, W., Scheffers, K., Al Harbi, A., Al Assaf, K. (2021). Intelligent Greenhouse Design Decreases Water Use for Evaporative Cooling in Arid Regions. *Agricultural Water Management*, 250, 106807.
- [12] Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Coşkun, S., Yamankaradeniz, N. (2013). *Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları* (Üçüncü Baskı). Türkiye: Dora Yayıncılık, 30-32.
- [13] Gülmez, M., Aktaş, M., Erten, S., Erdoğan, F. N., Öder, M. (2022). Design of an Air Source Heat Pump Having a Waste Heat Defrosting Method with Natural Refrigerant. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10, 468-478.
- [14] İnternet: ASKİ. “Su ve Atık Su Tarifesi (TL/m³)”. URL: <https://www.aski.gov.tr/tr/ucretler.aspx>.
- [15] İnternet: T.C. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu, (2023). URL: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>.

The Implementation of Internal Mode Control Method to SEPIC Converter for Battery Charging Systems

Fatih Süleyman TAŞKINCAN^{1*}  Ahmet KARAARSLAN¹  Zafer ORTATEPE² 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Nature Science, The Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

²Pamukkale University, Faculty of Technology, The Department of Automotive Engineering, Denizli, Turkey

Article Info:

Research article
Received: 24/09/2022
Revision: 04/11/2022
Accepted: 01/03/2023

Keywords

Internal mode control
Battery charging system
SEPIC converter

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:24/09/2022
Düzeltilme: 04/11/2022
Kabul: 01/03/2023

Anahtar Kelimeler

Dahili mod kontrolü
Batarya şarj sistemi
SEPIC dönüştürücü

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this paper, internal model control (IMC) method, which is model based approach offers more robust and better reference tracking capability than conventional controllers for the unstable process, is applied to SEPIC topology used in battery charging system for military implementations. / Bu çalışmada, askeri uygulamalar için batarya şarj sistemlerinde kullanılan SEPIC topolojisine, kararsız süreçler için geleneksel denetleyicilere göre daha sağlam ve daha iyi referans izleme yeteneği sunan model tabanlı bir yaklaşım olan dahili mod kontrol (IMC) yöntemi uygulanmıştır.

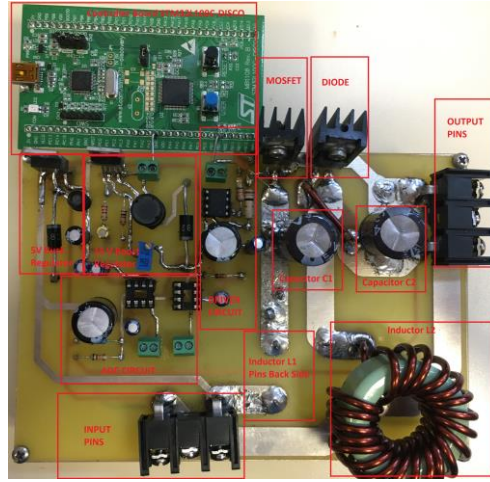


Figure A: The laboratory setup of the SEPIC board /Şekil A: SEPIC bordunun laboratuvar kurulumu

Highlights (Önemli noktalar)

- IMC method, which is model based approach offers more robust and better reference tracking capability. / Model tabanlı bir yaklaşım olan IMC yöntemi, daha sağlam ve daha iyi referans izleme yeteneği sunar.

Aim (Amaç): When a system is not based on a model, it is possible to encounter some problems in the control of the system, such as dead time and non-linearity. This study provides better performance of the system by using model based control approach. / Bir sistem bir modele dayalı olmadığında, sistemin kontrolünde ölü zaman ve doğrusal olmama gibi bazı sorunlarla karşılaşmak mümkündür. Bu çalışma, model tabanlı kontrol yaklaşımı kullanarak sistemin daha iyi performans göstermesini sağlar.

Originality (Özgünlük): IMC method implemented SEPIC converter is show better setpoint monitoring and more robustness for unstable process compared to conventional methods. / IMC yöntemi uygulanan SEPIC dönüştürücü, geleneksel yöntemlere kıyasla kararsız süreçler için daha iyi ayar noktası izleme ve daha sağlamlık gösterir.

Results (Bulgular): Simulation and experimental outcomes reveale controller's robustness in both transient and steady-state conditions, when compared to the conventional PI method. / Simülasyon ve deneysel sonuçlar, geleneksel PI yöntemiyle karşılaştırıldığında hem geçici hem de kararlı durum koşullarında denetleyicinin sağlamlığını ortaya koymaktadır.

Conclusion (Sonuç): IMC can be regarded as a suitable control method for conventional power supplies that provide quick response and steady-state benefits. / IMC, hızlı yanıt ve kararlı durum faydaları sağlayan geleneksel güç kaynakları için uygun bir kontrol yöntemi olarak kabul edilebilir.



The Implementation of Internal Mode Control Method to SEPIC Converter for Battery Charging Systems

Fatih Süleyman TAŞKINCAN^{1*} Ahmet KARAARSLAN¹ Zafer ORTATEPE²

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Nature Science, The Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

²Pamukkale University, Faculty of Technology, The Department of Automotive Engineering, Denizli, Turkey

Article Info

Research article
Received: 24/09/2022
Revision: 04/11/2022
Accepted: 01/03/2023

Keywords

Internal mode control
Battery charging system
SEPIC converter

Abstract

In this paper, internal model control (IMC) method, which is model based approach that offers more robust and better reference tracking capability than conventional controllers for the unstable process, is applied to SEPIC topology used in battery charging system for military implementations. When a system is not based on a plant model, it is possible to encounter some problems such as dead time and non-linearity in controlling of the system. The purpose of the SEPIC topology is to eliminate the disadvantage of other converter types such as buck/boost and çük converters that are used for similar applications in reversing the output voltage. In addition, a great amount of voltage and current stress on a component causes the power board to overheat in such converters and requires additional cooling equipment. These problems are not encountered in SEPIC topology. Also, this topology provides high efficiency, step-up/step-down voltage conversion, and excellent transient state response over a wide range. The performance of IMC method applied on SEPIC converter is detailed analyzed in terms of simulation studies that are obtained by using MATLAB/Simulink and experimental studies.

Akü Şarj Sistemleri İçin Dahili Mod Kontrol Yönteminin SEPIC Dönüştürücüye Uygulanması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2022
Düzeltilme: 04/11/2022
Kabul: 01/03/2023

Anahtar Kelimeler

Dahili mod kontrolü
Batarya şarj sistemi
SEPIC dönüştürücü

Öz

Bu çalışmada, askeri uygulamalar için batarya şarj sistemlerinde kullanılan SEPIC topolojisine, kararsız süreçler için geleneksel denetleyicilere göre daha sağlam ve daha iyi referans izleme yeteneği sunan model tabanlı bir yaklaşım olan dahili mod kontrol (IMC) yöntemi uygulanmıştır. Bir sistem, bir modele dayalı olmadığında, sistemin kontrolünde ölü zaman ve doğrusal olmama gibi bazı sorunlarla karşılaşmak mümkündür. SEPIC topolojisinin amacı, benzer uygulamalar için kullanılan buck/boost ve çük dönüştürücüler gibi diğer dönüştürücü türlerinin çıkış geriliminin ters çevrilmesindeki dezavantajını ortadan kaldırmaktır. Ayrıca, bir bileşen üzerindeki büyük miktarda voltaj ve akım stresi, bu tür dönüştürücülerde güç kartının aşırı ısınmasına neden olur ve ek soğutma ekipmanı gerektirir. SEPIC topolojisinde bu problemlerle karşılaşılmaz. Ayrıca, bu topoloji, geniş bir aralıkta yüksek verimlilik, yükseltme/düşürme gerilim dönüşümü ve mükemmel geçici durum yanıtı sağlar. SEPIC dönüştürücü üzerinde uygulanan IMC yönteminin performansı, MATLAB/Simulink kullanılarak elde edilen simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışmalar açısından detaylı olarak incelenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

DC-DC power converters are required to respond dynamically to sudden variations in frequency, load and input voltage. In addition, they must provide reliable and efficient output voltage without voltage sag and swell. Due to the heat, the efficiency of linear regulators (LRs) is lower than switching

mode power supplies (SMPS) though they produce small ripples of output voltage. On the contrary, the LRs do not have a step-up capability, they are only step-down the voltage. Therefore, they are preferred in low power applications. The SMPS is used in all power applications due to high efficiency, lower

switching loss and the most important one is reliability.

SMPS stores energy using various energy storage components such as capacitor and inductor. The energy that is stored in these components can be transferred to the output using different control methods through switching elements. One of the popular methods for controlling turn-on and turn-off mode of a switching device to transfer energy to load side is Pulse Width Modulation (PWM) that involves adjusting the width of a high-frequency pulse signal. Different SMPS topologies are available to be used by power electronics societies for various purposes. Boost/buck/buck-boost converters, most widely used topologies, are called non-isolated topologies because the lack of galvanic isolation between input/output voltages.

The Cúk and SEPIC topologies have been improved by adding low-pass filter to conventional topologies [1]. Output voltage ripple for this type of converter is reasonable and can be less than 2% [2]. Since there are two inductors in these topologies, it is called a two-stage converter, and both input and output currents are naturally filtered with an LC low pass filter. Also, charging and discharging capacitors by means of inductors prevents high current increases and this table 2 makes the topology efficient [3]. Compared to Cúk converter, SEPIC converter has an advantage in that it produces an output voltage with rectified polarity.

In [4] and [5], Garcia de Viculia et al. analyzed the SEPIC converter in discontinuous conduction mode (DCM) and continuous conduction mode (CCM). In [6], transfer function of the SEPIC converter is calculated by state space averaging (SSA) method that is operated in CCM using feedback control design. In [7], R. Jose et al. have compared various SEPIC converter topologies. They have obtained the new resonant SEPIC converter with higher efficiency, smaller size and better transient response.

There are situations where switching converter such as SEPIC topology may need to function as a power supply, as well as maintain batteries that are used in military applications. The SEPIC converter that is designed properly can supply several amps continuously if the load demands it. The control methods used can directly impact the output voltage of the SMPS, making the performance of these algorithms a crucial factor to consider. Due to its effectiveness and straightforwardness in linear systems, the Proportional-Integral-Derivative (PID) control method is commonly favored in SMPS topologies. There are also some problems such as non-linearity and dead time in controlling the

dynamic plant of the model in the PID control method [8]. The development of model-based control (MBC) approaches has been propelled by these concerns. Compared to the conventional ones, the Internal Mode Control (IMC) method, which is one of the MBC methods, shows a better reference tracking capability and more robustness for unbalanced applications [9]. The IMC method estimates the plant output in parallel and according to the estimation, applies a corrective effect [10]. In addition, the stability of IMC method depends on the plant and the controller such as the conventional control methods [11].

A new technique for obtaining a parallel model to the plant is presented in reference [9], a single-input single-output (SISO) system was then utilized by Garcia and Morari [10]. This approach incorporates various conventional techniques such as the dead-beat controller, Dahlin method and Smith estimator. Afterwards, this approach is integrated into discrete-time multiple-input multiple-output (MIMO) systems [12]. Reference [13] presents a boost-type DC-DC converter operating in CCM utilizes a two degrees of freedom (2DOF) IMC design to regulate the output voltage. Xiaodong Sun et al. analyzed a bearingless permanent magnet synchronous motor (BPMSM) by using IMC and inverse system technique in [14]. In [15], a new controller is designed for permanent magnet synchronous motor (PMSM) using both support vector machine generalized inverse (SVMGI) and IMC.

In this paper, IMC method is implemented for a SEPIC converter for battery charging system used in military applications due to the better setpoint monitoring and more robustness for unstable process compared to conventional methods. The theory and principle of SEPIC converter are given in part 2. Control strategies of the IMC and its comparison with the conventional PI control method is described for the SEPIC converter in part 3. The design of the topology is given in part 4. Simulation and test bench results are presented in part 5 and 6, respectively. Conclusion part is also given in the last chapter.

2. THEORY AND PRINCIPLES OF SEPIC CONVERTER (SEPIC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN TEORİSİ VE PRENSİPLERİ)

2.1. The Operation of SEPIC Converter (SEPIC Dönüştürücünün Çalışması)

The fact that it has a non-inverting structure has made the use of SEPIC converter popular. The SEPIC converter can maintain a stable output voltage despite variations in the input voltage,

moreover, it is possible for the output voltage to be higher or lower than the input voltage. Applied duty cycle of the switching device can be modified to achieve desired output voltage or source current. It is a fourth-order time-varying converter with two switching states, one MOSFET, one diode, two inductors and two capacitors. The topology diagram of a typical SEPIC converter is illustrated in Figure 1.

The input side of SEPIC converter consists of an inductor (L_1) and switching element (S), like the standard boost converter, from which an output voltage higher than the input voltage can be obtained. When the switching element S is turned-on, the inductor L_1 is charged by current V_{in}/L_1 . Besides, due to the diode D has reverse biased, no current flows through it and therefore inductor L_2 is charged by current V_{C1}/L_2 .

When the switching element S is turned-off, currents i_{L1} and i_{L2} flow to the load through diode D . Thus, the capacitor C_1 charges through the inductor L_1 ; Capacitor C_2 charges through inductors L_1 and L_2 . The voltage across the inductor L_2 equals to $-V_o$ during the turn-off state. In this mode, energy flows from inductors L_1 and L_2 to the load. Modulation Index (MI) that is related to duty cycle, input and output voltage is similar with Cûk converter without reverse polarity.

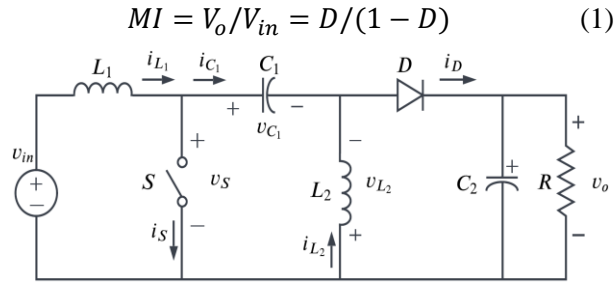


Figure 1. The structure of SEPIC Converter

2.2.State Space Modelling Of SEPIC Converter

(SEPIC Dönüştürücünün Durum Uzay Modeli)

The general state space equations are given in (2) and (3), respectively.

$$\dot{x} = Ax + B \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_1 & 0 \\ 0 & -1/L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/RC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L_1 & 0 & -1/L_1 \\ 1/C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/L_2 \\ 1/C_2 & 0 & -1/C_2 & -1/RC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \tag{6}$$

$$y = Cx + Du \tag{3}$$

Where, x represents state-space vector, \dot{x} represents state variable vector; u represents input signal; y represents output signal; A represents state matrix; B represents vector; C represents vector associated with the state variable and D represents vector relating input to the output. Also, both turn-on and turn-off modes are given in Figure 2 by using CCM operation.

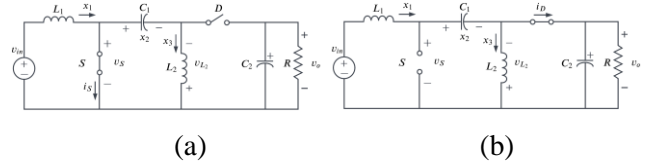


Figure 2. Operating modes of SEPIC converter
(a) the switch is turn-on state, (b) the switch is turn-off state

The state variables are considered as $x_1 = i_{L1}$, $x_2 = v_{C1}$, $x_3 = i_{L2}$ and $x_4 = v_{C2}$. In Figure 2 (a), when switch is turn-on, SEPIC converter state space model is expressed (4) and (5).

$$V_{out} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{5}$$

In Figure 2 (b), when switching element is turn-off, SEPIC converter state space variables are expressed given (6) and (7).

$$V_{out} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{7}$$

During the model extraction, switching element is assumed ideal and the parasitic elements ($r_{L1}, r_{L2}, r_{C1}, r_{C2}$) are assumed to be negligible, state space model is expressed as:

$$\dot{x} = [A_1d + A_2d^-]x + [B_1d + B_2d^-]u \tag{8}$$

$$y = [C_1d + C_2d^-]x + [D_1d + D_2d^-]u \tag{9}$$

where $d = \frac{t_{on}}{T}$ and $d^- = 1 - d = \frac{t_{off}}{T}$. DC and AC parts of the variables d, x, u and y can be expressed given below:

$$\begin{aligned}
 d &= D + \tilde{\delta} \\
 x &= X + \tilde{x} \\
 u &= V_{in} + \tilde{v}_{in} \\
 y &= V_{out} + \tilde{v}_{out}
 \end{aligned} \tag{10}$$

The first terms in the equations represent the DC signal part, and the second terms represent the AC signal part. When these equations are put into a time-weighted average equation, they can be expressed as (11) and (12).

To determine a signal response, AC signal disturbances at the input (\tilde{v}_{in}) are neglected as (13) and (14). To solve the equation, it needs to be transformed to the frequency domain given (15). The relationship between control and output can be calculated as (16).

3. THEORY AND PRINCIPLES OF IMC METHOD (IMC Metodunun Teorisi ve Prensipleri)

The conventional feedback model and a specific property of the proposed IMC method that implemented to the SEPIC converter is given in Figure 3 (a) and (b), respectively.

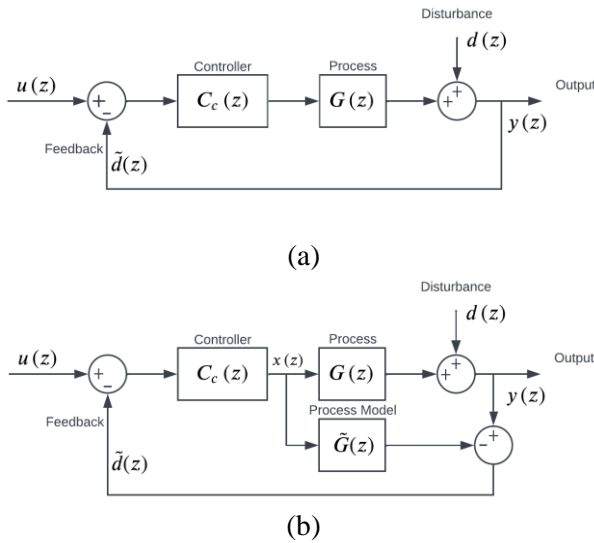


Figure 3. (a) Conventional feedback structure of the system (b) proposed IMC method of the System

$$\dot{x} = [A_1(D + \tilde{\delta}) + A_2(1 - D - \tilde{\delta})](X + \tilde{x}) + [B_1(D + \tilde{\delta}) + B_2(1 - D - \tilde{\delta})](V_{in} + \tilde{v}_{in}) \tag{11}$$

$$V_{out} + \tilde{v}_{out} = [C_1(D + \tilde{\delta}) + C_2(1 - D - \tilde{\delta})](X + \tilde{x}) + [B_1(D + \tilde{\delta}) + B_2(1 - D - \tilde{\delta})](V_{in} + \tilde{v}_{in}) \tag{12}$$

$$\dot{x} = [A_1D + A_2D^-]X + [B_1D + B_2D^-]V_{in} + [(A_1 - A_2) + (B_1 - B_2)V_{in}]\tilde{\delta} \tag{13}$$

$$V_{out} + \tilde{v}_{out} = [C_1D + C_2D^-]X + [C_1D + C_2D^-]\tilde{x} + [(C_1 - C_2)X]\tilde{\delta} + [D_1(D + \tilde{\delta}) + D_2(D^- - \tilde{\delta})]V_{in} \tag{14}$$

$$X(s) = [sI - (A_1D + A_2D^-)]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_{in}]\tilde{\delta}(s) \tag{15}$$

$$\frac{V_{out}}{\tilde{\delta}}(s) = [D_1D + D_2D^-][sI - (A_1D + A_2D^-)]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_{in}] + [(C_1 - C_2)X] \tag{16}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \frac{G(1) \tilde{G}(1)^{-1}}{1 + \tilde{G}(1)^{-1}(G(1) - \tilde{G}(1))} (1 - d(1)) + d(1) = 1 \tag{24}$$

Figure 3 (b) shows that the plant model $\tilde{G}(z)$ is positioned in parallel with $G(z)$, which enables it to make predictions. When the plant model $\tilde{G}(z)$ is equivalent to the plant $G(z)$, any disturbance in the plant is solely caused by the disturbance $d(z)$.

According to the Figure 3 (b), the transfer functions of $m(z)$ and $y(z)$ for the IMC method are calculated as follows:

$$x(z) = \frac{G_c(z)}{1 + G_c(z)(G(z) - \tilde{G}(z))} (u(z) - \tilde{d}(z)) \tag{17}$$

$$y(z) = d(z) + \frac{G_c(z)G(z)}{1 + G_c(z)(G(z) - \tilde{G}(z))} (u(z) - \tilde{d}(z)) \tag{18}$$

For stability, the roots of the characteristic functions given below should be in the unit cycle.

$$\frac{1}{G_c(z)} + (G(z) - \tilde{G}(z)) = 0 \tag{19}$$

$$\frac{1}{G(z)G_c(z)} + \frac{1}{G_c(z)} (G(z) - \tilde{G}(z)) = 0 \tag{20}$$

The benefits of the IMC are analyzed given below:

Stability: The model is assumed ideal; and the plant model $\tilde{G}(z)$ is identical to $G(z)$. Characteristic functions are transformed below equations, specifying that the poles are into the unit loop.

$$\frac{1}{G_c(z)} = 0 \text{ and } \frac{1}{G(z)G_c(z)} = 0 \tag{21}$$

Control: If system control cannot be performed, it is important how close the controller should be to the ideal control point. An inverse model provided below is utilized to represent the plant as invertible and non-invertible components during the control design process:

$$\tilde{G}(z) = \tilde{G}_+(z) \tilde{G}_-(z) \tag{22}$$

where $\tilde{G}_+(z)$ indicates non-minimum phase characteristic of system. For ideal controller, (18) is transformed as:

$$y(z) = G_+(z)s(z) + (1 - G_+(z))d(z) \tag{23}$$

Offset: $G_c(1) = 1/\tilde{G}(1)$ provides that the controller does not give any offset as given in (24).

To provide that the system maintains robust against any distortion, low-pass filter is added to the controller as follows [12].

$$G_c(z) = \tilde{G}^{-1}F \quad (25)$$

$$F = \text{diag} \left(\frac{1-a_i}{1-a_i z^{-1}} \right); \quad 0 \leq a_i \leq 1 \quad (26)$$

Therefore, (18) is transformed as:

$$y(z) = G_+(z) F(z) (s(z) - d(z)) + d(z) \quad (27)$$

The filter design is expanded by [11] for the plant model given below:

$$F_r(s) = \frac{1}{(\lambda_r s + 1)^n} \quad (28)$$

λ_r : Tuning parameter

n : Relative order of minimum phase

Distortion and variations can be evaluated against Integral Absolute Error (IAE) or Integral Square Error (ISE). IAE can be defined as the integral of absolute difference between reference and output signals and can be given as follows:

$$IAE = \int_0^{T_s} |s(t) - y(t)| dt \quad (29)$$

where T_s is settling time and the factorization can be minimized by IAE as (30):

$$G_+(s) = \prod_i (-\beta i s + 1) \quad \text{Re}(\beta i) > 0 \quad (30)$$

ISE is equivalent to the integral of the squared difference between the reference and output signals. This approach rapidly corrects errors while still allowing for minor errors to remain within an acceptable range.

$$ISE = \int_0^{T_s} (s(t) - y(t))^2 dt \quad (31)$$

where T_s is settling time and the factorization can be minimized by ISE as (32):

$$G_+(s) = \prod_i \frac{-\beta i s + 1}{\beta i s + 1} \quad \text{Re}(\beta i) > 0 \quad (32)$$

Consequently, the complementary sensitivity equations can be calculated as follows:

$$T_{IAE} = \prod_i (-\beta i s + 1) \frac{1}{(\lambda_r s + 1)^n} \quad (33)$$

$$T_{ISE} = \prod_i \frac{-\beta i s + 1}{\beta i s + 1} \frac{1}{(\lambda_r s + 1)^n} \quad (34)$$

4. DESIGN OF THE CONVERTER AND CONTROLLER (Dönüştürücü Ve Kontrolcü Tasarımı)

4.1. Calculation of the Inductor Value (İndüktör Değerinin Hesaplanması)

The L_1 and L_2 inductance values are calculated by minimum input voltage, which results a peak-to-peak ripple current of around 30% of maximum current. For inductors considered equal to each other, the ripple current is expressed as:

$$\Delta I_L = I_{in} * 30\% = \frac{I_{out} * V_{out}}{V_{in(min)}} * 30\% \quad (35)$$

Besides, the inductance is calculated as follows:

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{in(min)}}{\Delta I_L * f_{sw}} D_{max} \quad (36)$$

4.2. Calculation of the Coupling Capacitor (C_1) (Kuplaj Kondansatörünün Hesaplanması)

The coupling capacitor's size is primarily determined by the RMS current, and the current flowing through the capacitor can be described as:

$$I_{C1_{rms}} = I_o * \sqrt{(V_o + V_D) / V_{in_{min}}} \quad (37)$$

Voltage ripple across coupling capacitor is defined peak-to-peak given below:

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_o * D_{max}}{C_1 * f_{sw}} \quad (38)$$

4.3. Calculation of Output Capacitor (C_2) (Çıkış Kondansatörünün Hesaplanması)

When the switching element is turned-on, the load-side current is supplied by output capacitor, and RMS current flowing through output capacitor can be given below:

$$I_{O_{rms}} = I_o * \sqrt{(V_{out} + V_D) / V_{in_{min}}} \quad (39)$$

Moreover, value of the output capacitor (C_2) can be expressed given below:

$$C_2 \geq \frac{I_o * D_{max}}{V_{ripple} * f_{sw}} \quad (40)$$

According to design parameters and specifications, calculated values are given in Table 1.

4.4. IMC Controller Design (IMC Kontrolcüsünün Tasarımı)

As a result of the design calculation, relation between small signal duty cycle and output is expressed as (41). The matrices of the zeros and poles can be defined as (42) and (43).

$$\frac{V_{out}}{\delta}(s) = \frac{(1.441e-12)s^3 + (4.234e-07)s^2 + (0.0003408)s + 112.9}{(2.206e-17)s^4 + (2.793e-14)s^3 + (9.597e-09)s^2 + (7.541e-06)s + 0.9709} \quad (41)$$

$$Zeros = (1.0e + 05) \begin{bmatrix} -2.9403 + 0.0000i \\ 0.0005 + 0.1633i \\ 0.0005 - 0.1633i \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$Poles = (1.0e + 04) \begin{bmatrix} -0.0027 + 1.6582i \\ -0.0027 - 1.6582i \\ -0.0606 + 1.2638i \\ -0.0606 - 1.2638i \end{bmatrix} \quad (43)$$

Table 1. Parameters and specifications of the SEPIC converter

Symbol	Description	Calculated
C_1	Coupling capacitor	$\approx 135 \mu\text{F}$
C_2	Output capacitor	$\approx 271 \mu\text{F}$
L_1	Inductor	$\approx 9 \mu\text{H}$
L_2	Inductor	$\approx 9 \mu\text{H}$
I_{L1}	Peak current of L_1 inductor	32.74 A
I_{L2}	Peak current of L_2 inductor	10.27 A
V_{RD1}	Reverse voltage of diode	64 V
$I_{Q1(max)}$	Maximum current of the switch	43.01 A
I_{Q1rms}	RMS current of the switch	32.63

The reversible part of the equation according to the ISE criterion is:

$$G_+(s) = \frac{s^2 - 102s + 2.665e08}{s^2 + 102s + 2.665e08} \quad (44)$$

Also, the irreversible part is expressed as in (45). Elimination of unstable poles makes the controller as in (46). As a result, the filter is designed in the following manner:

$$F(s) = \frac{1e10}{0.012s^2 + 1.2s} \quad (47)$$

5. SIMULATION RESULTS (SİMÜLASYON SONUÇLARI)

In order to avoid overshoot in output voltage and to keep voltage fluctuations within the desired limits, simulation of the IMC method implemented to SEPIC topology is depicted in Figure 4. In addition, simulation studies are performed by using MATLAB/Simulink program.

Waveforms of output voltage, the zoom view of output voltage and output current at minimum input voltage and maximum duty cycle by using IMC method are illustrated in Figure 5, respectively.

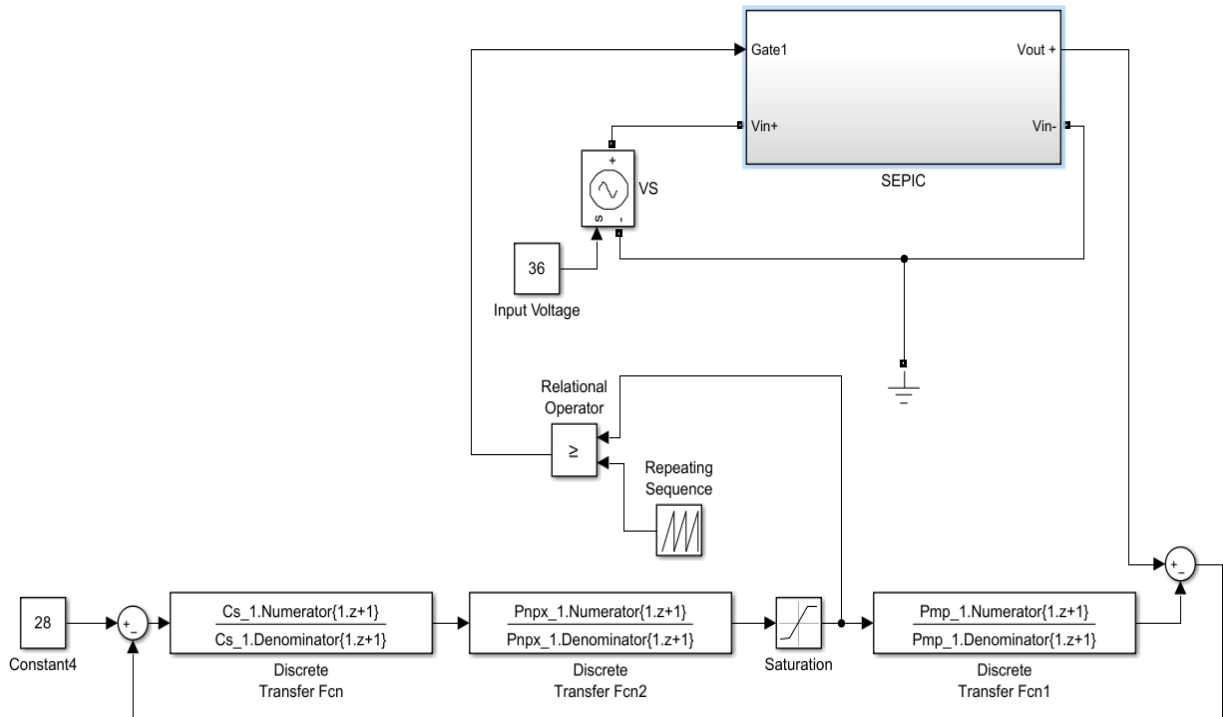


Figure 4. Simulation setup of the IMC method implemented to the SEPIC converter

$$G_-(s) = \frac{V_{out}}{\delta}(s) * \frac{1}{G_+(s)} = \frac{(6.531e04)s^3 + (1.921e10)s^2 + (1.937e13)s + 5.118e18}{s^4 + 1266s^3 + 4.351e08s^2 + 3.419e11s + 4.402e16} \quad (45)$$

$$C_s = \frac{1}{G_-(s)} * \frac{1}{(s - Poles(3,1)) * (s - Poles(4,1))} = \frac{1.531e-05s^2 + 0.000833s + 4210}{s^3 + 2.941e05s^2 + 2.965e08s + 7.837e13} \quad (46)$$

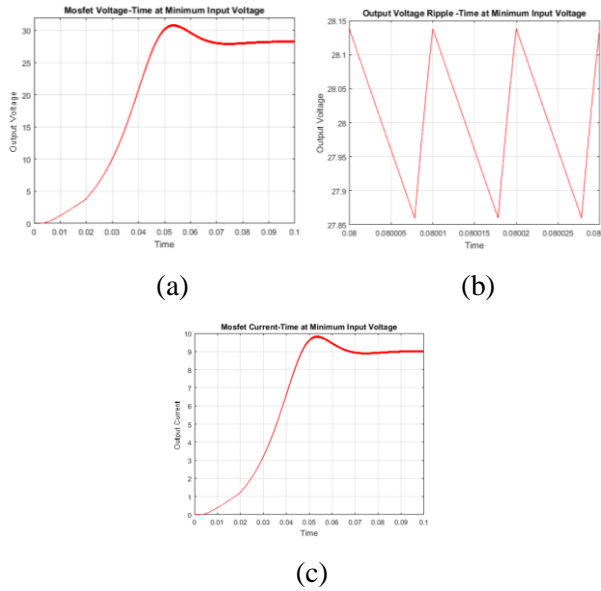


Figure 5. a) Output voltage, b) zoom view of output voltage, c) output current

Waveforms of output voltage, the zoom view of output voltage and output current at maximum input voltage and minimum duty cycle by using IMC method are illustrated in Figure 6, respectively.

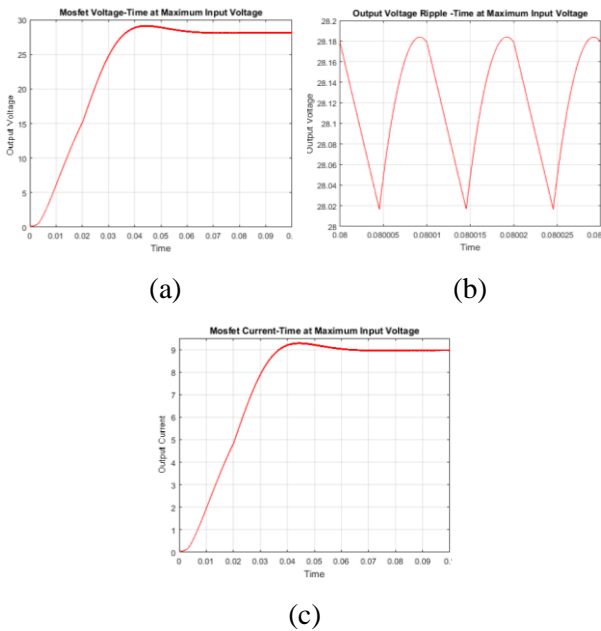


Figure 6. a) Output voltage, b) zoom view of output voltage, c) output current

Figure 7 (a) depicts how the SEPIC converter reacts to changes in input voltage. Topology is controlled by the IMC method and input voltage is increased from 18 V to 30 V in 2 V steps. The results confirm that the transient response is fast and the steady-state error is minimal. The reply of the converter to the load variations has been performed at minimum input voltage by increasing the load by 30% every 100 ms. The response of output voltage and output

current to load change is given in Figure 7 (b) and (c), respectively.

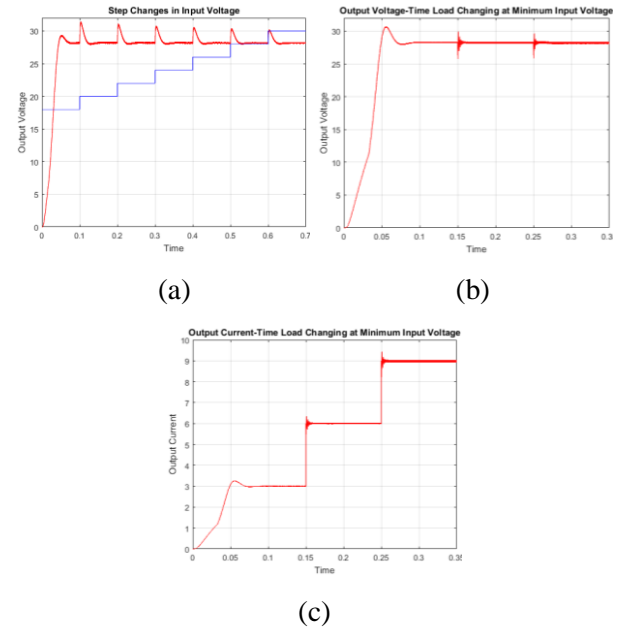


Figure 7. (a) Response of the output voltage (red) and input voltage (blue) for input voltage variations (b) output voltage waveform during load variation (c) output current waveform during load variation

6. EXPERIMENTAL VERIFICATION (DENEYSSEL DOĞRULAMA)

6.1. Design of SEPIC Converter (SEPIC Dönüştürücü Tasarımı)

The view of SEPIC power circuit designed to be used in experimental studies is given in Figure 8. Two layer PCB circuit is designed by using the Altium Designer program and consists of the following components: (1) Buck-Boost regulator circuit; (2) analog to digital converter (ADC) circuit; (3) SEPIC power circuit; (4) gate driver circuit; (5) Controller Board (STM32L100C-DISCO).

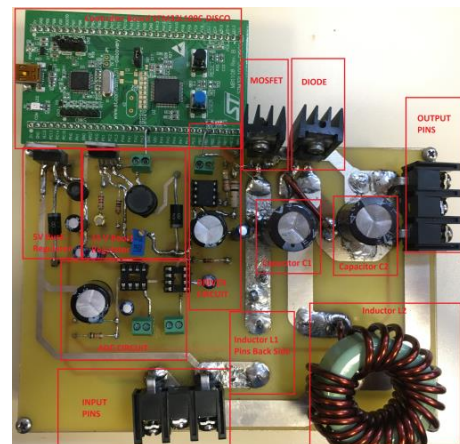
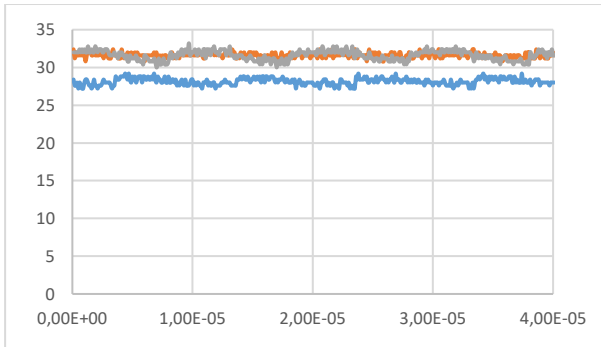


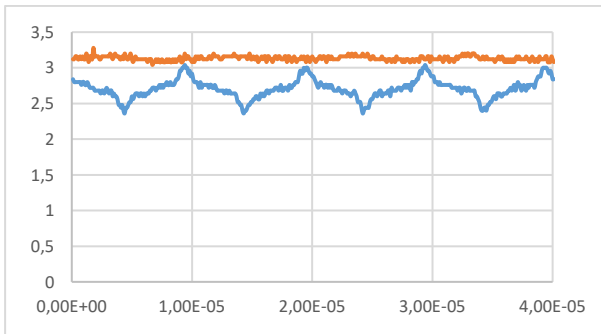
Figure 8. The laboratory setup of the SEPIC board

6.2. Test Results (Test Sonuçları)

This study examines the response of the SEPIC converter under different load conditions while in a steady-state. Therefore, input/output voltages, input/output currents, coupling capacitor voltage, V_{GS} and V_{DS} voltages of MOSFET are observed under the steady-state condition. All experimental data in this study is gathered using an oscilloscope and then translated into graphs using Microsoft Excel. Under the $10\ \Omega$ resistive load conditions and 32 V input voltage, Figure 9 (a) displays the waveforms of the input voltage, output voltage, and coupling capacitor voltage for the SEPIC converter. Besides, Figure 9 (b) shows the waveforms of the input and output currents of the SEPIC converter when subjected to $10\ \Omega$ resistive load and 32 V input voltage status.



(a)

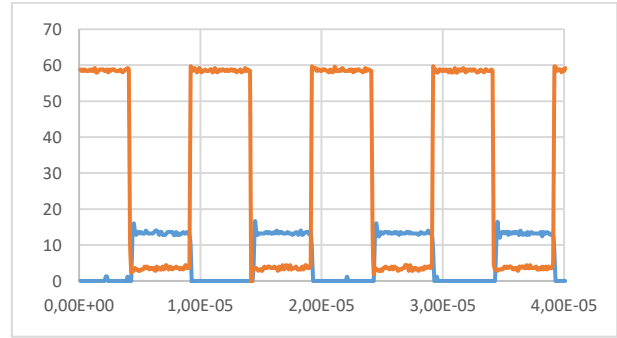


(b)

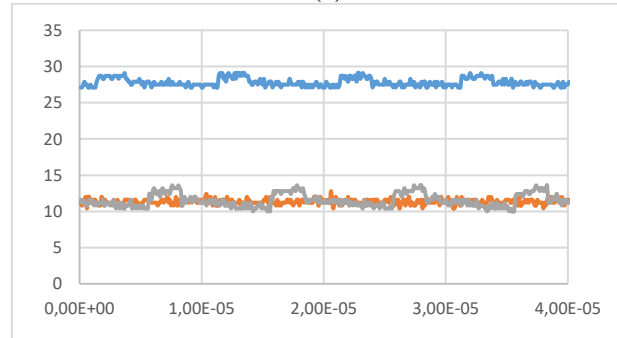
Figure 9. Waveforms under the 32 V input voltage and $10\ \Omega$ resistive load condition (a) input voltage (orange), output voltage (blue) and coupling capacitor voltage (grey) waveforms (b) input (orange) and output (blue) current waveforms

Under the $10\ \Omega$ resistive load and 32 V input voltage condition, Figure 10 (a) illustrates the voltage waveforms of the MOSFET V_{DS} and V_{GS} for the SEPIC converter. Besides, Figure 10 (b) displays the waveforms of the input/output and coupling capacitor voltages of the SEPIC converter when

subjected to $10\ \Omega$ resistive load and 13 V input voltage conditions.

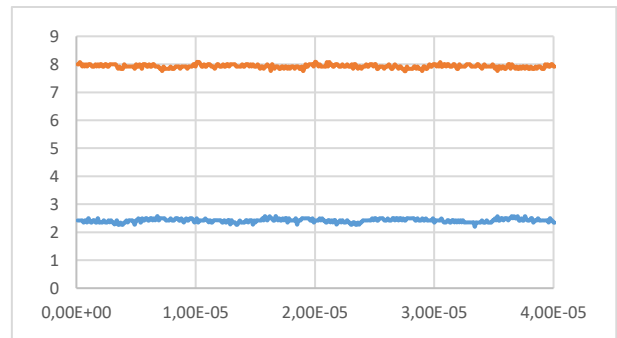


(a)

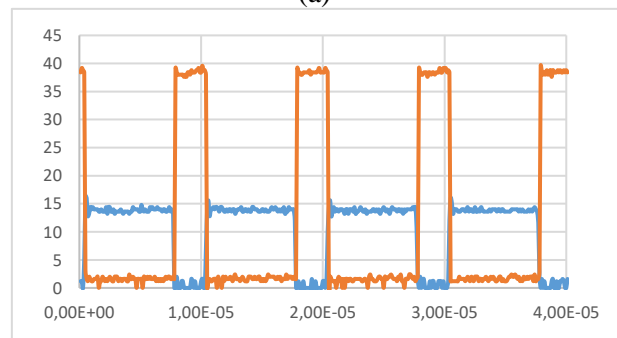


(b)

Figure10. (a) MOSFET V_{DS} (orange) and V_{GS} (blue) voltage waveforms under the 32 V input voltage and $10\ \Omega$ resistive load condition (b) input (orange)/output (blue) and coupling capacitor voltage (grey) waveforms under the 13 V input voltage and $10\ \Omega$ resistive load condition



(a)



(b)

Figure 11. Waveforms under the 13 V input voltage and $10\ \Omega$ resistive load condition (a) input current (orange), output current (blue) waveforms (b) MOSFET V_{DS} (orange) and V_{GS} (blue) voltage

waveforms

Under the 10 Ω resistive load and 13 V input voltage condition, Figure 11 (a) illustrates the waveforms of the input/output currents of the SEPIC converter. In addition, Figure 11 (b) illustrates the voltage waveforms of MOSFET V_{DS} and V_{GS} for the SEPIC converter under the 10 Ω resistive load and 13 V input voltage conditions.

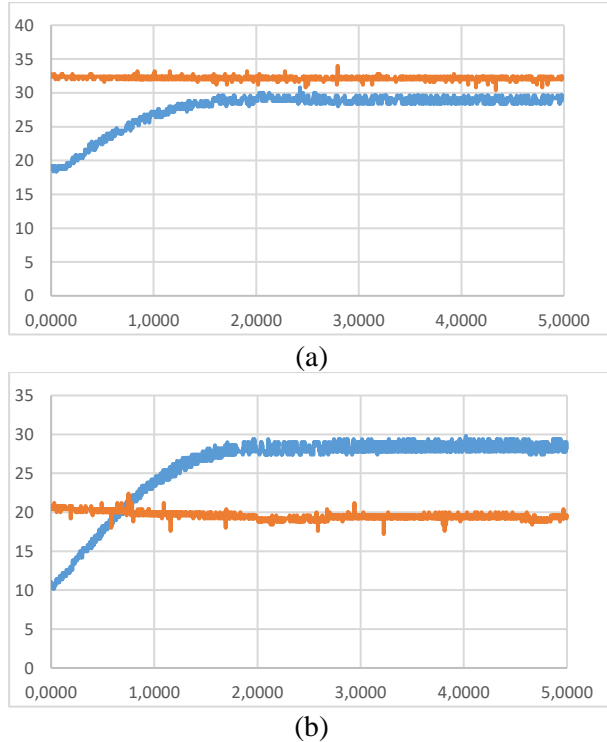


Fig. 12. (a) Input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 32 V input voltage and 10 Ω resistive load condition (b) input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 20 V input voltage and 10 Ω resistive load condition

This study has not only examined steady-state response of SEPIC converter under different load conditions but has also investigated its transient responses to variations in both load and input voltage. Under the 10 Ω resistive load and 32 V input voltage condition in the transient state, Figure 12 (a) illustrates the waveforms of input/output voltages of SEPIC converter. Also, Figure 12 (b) displays the waveforms of input/output voltages of

SEPIC converter in transient state when subjected to the 10 Ω resistive load and 20 V input voltage conditions.

Output voltage overshoot ratios for proposed and conventional PI control methods in transient have been observed under different load and input voltage conditions and these data are presented in Table 2.

Under the transient state and load variation from 20Ω to 10Ω with 32 V input voltage, Figure 13 (a) illustrates the waveforms of input/output voltages of SEPIC converter. Besides, Figure 13 (b) shows the waveforms of input/output voltages of SEPIC converter under the transient state and load variation from 10Ω to 20Ω with 32 V input voltage.

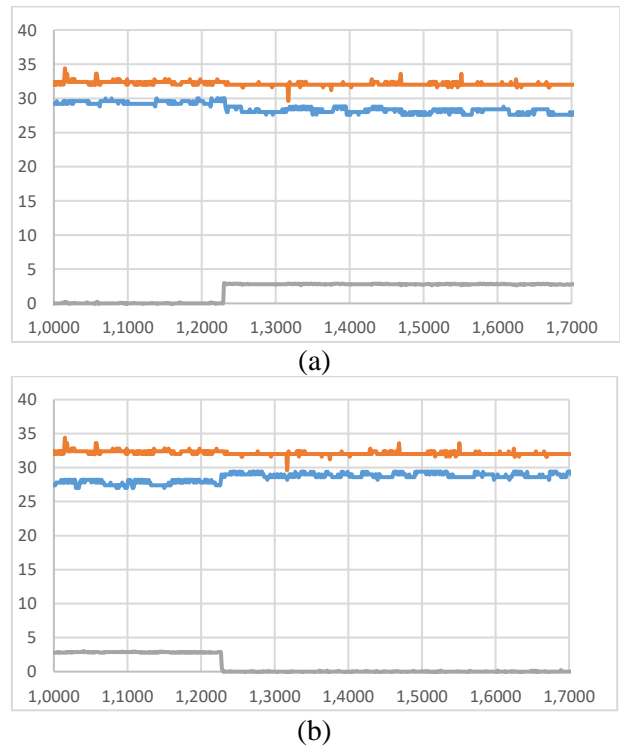


Figure 13. Input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 32V input voltage and resistive load variation (from 20Ω to 10Ω) (grey - step change) (b) input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 32V input voltage and resistive load variation (from 10Ω to 20Ω) (grey - step change)

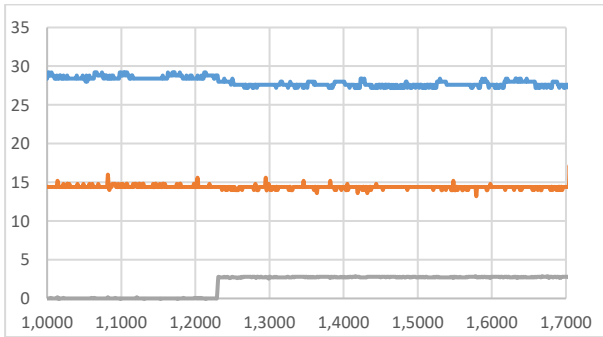
Table 2. Voltage overshoot ratios for proposed and conventional PI control methods in transient state

	10 Ω		15 Ω			20 Ω		
Input voltage (V)	19.6V	32.15V	14.49V	19.99V	32.45V	10.41V	20.21V	32.49V
ICM Control Method								
Overshoot (%)	6.4%	10%	7.1%	8.6%	4.3%	8.6%	7.1%	5.7%
Conventional PI Control Method								

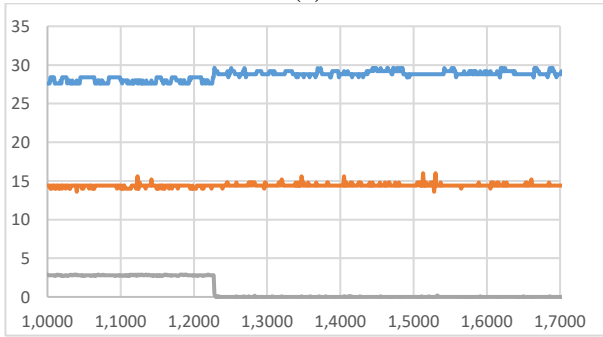
Overshoot (%)	7.3%	11.5%	7.9%	9.2%	4.8%	9.3%	7.8%	6.2%
----------------------	------	-------	------	------	------	------	------	------

Under the transient state and load variation from 20Ω to 15Ω with 15 V input voltage, Figure 14 (a) displays the waveforms of input/output voltages of SEPIC converter. In addition, Figure 14 (b) illustrates the waveforms of input/output voltages of SEPIC converter under transient state and load variation from 15Ω to 20Ω with 15 V input voltage.

Besides, output voltage overshoot ratios under different voltage and load variations for proposed and conventional PI control methods in transient state have been observed under different load and input voltage variations and these data that obtained from the experimental study are presented in Table 3.



(a)



(b)

Figure 14. Input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 15 V input voltage and resistive load variation (from 20Ω to 15Ω) (grey - step change) (b) input (orange)/output voltage (blue) waveforms under the 15 V input voltage and resistive load variation (from 15Ω to 20Ω) (grey - step change)

7. CONCLUSION (SONUÇ)

The primary objective of this study is to design a controller that ensures the robust performance of the SEPIC converter, suitable for battery charging in military applications. To achieve this objective, an optimal internal model control (IMC) controller is developed to overcome improved setpoint tracking and minimal disturbance in SEPIC converter. Thus, problems faced in parameter setting of the PID controller, which is frequently used today, with the IMC controller have been compensated. The results obtained from the topology have been validated by simulation and experiments.

Simulation and experimental outcomes of SEPIC converter controlled by IMC technique revealed controller's robustness in both transient and steady-state conditions, when compared to the conventional PI method. Therefore, IMC can be regarded as a suitable control method for conventional power supplies that provide quick response and steady-state benefits.

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)

Fatih Süleyman TAŞKINCAN: He conducted the literature review, experiments and analyzed the results.

Ahmet KARAARSLAN: He conducted the conception, design and supervision process.

Zafer ORTATEPE: He performed the interpretation, writing and critical review process.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this stud

Table 3. Output voltage overshoot ratios under different voltage and load variations for proposed and conventional PI control methods in transient state



Input voltage (V)	10-20Ω	20-10Ω	10-20Ω	20-10Ω	15-20Ω	20-15Ω	15-20Ω	20-15Ω
	19.66V	32.15V	19.68V	32.18V	14.39V	14.40V	32.24V	32.30V

ICM Control Method								
Overshoot (%)	+8.57%	-8.57%	+5.7%	-4.3%	+4.3%	-2.86%	+2.86%	-2.86%
Conventional PI Control Method								
Overshoot (%)	+9.13%	-9.15%	+6.15%	-4.8%	+4.85%	-3.13%	+3.21%	-3.21%

REFERENCES (REFERANSLAR)

- [1] Massey R.P., & Snyder E.C. (1977). High voltage single-ended DC/DC converter, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 156-159.
- [2] Luo F.L., & Ye H. (2004). Advanced DC/DC Converters, CRC Press, 55-60.
- [3] Roberts S. (2016). DC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User (3rd Ed.), 1-59.
- [4] Font J., Vicuña L. G., Guinjoan F., Majó J., & Martinez L. (1987). A contribution to the analysis of the SEPIC converter, Proceedings of the IASTED Symposium Identification Modelling and Simulation, 355-358.
- [5] Vicuña L. G., Guinjoan F., Majó J., & Martinez L. (1989). Discontinuous conduction mode in the SEPIC converter, MELECON '89: Mediterranean Electrotechnical Conference Proceedings. Integrating Research Industry and Education in Energy and Communication Engineering, 38-42.
- [6] Eng V., Pinsopon U., & Bunlaksananusorn C. (2009). Modeling of a SEPIC converter operating in continuous conduction mode, 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Pattaya, Chonburi, 136-139.
- [7] Jose R., Anisha S., Vani V., & Kshemada D. (2015). DC-DC SEPIC converter topologies, International Journal of Research in Engineering and Technology, 04(05), 20-23.
- [8] Bequette B. W. (1991). Nonlinear control of chemical processes: a review, Industrial & Engineering Chemistry Research, 1391-1413.
- [9] Muhammad D., Ahmad Z., & Aziz N. (2010). Implementation of internal model control (IMC) in continuous distillation column, Proc. of the 5th International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Processes, 812-821.
- [10] Garcia C. E., & Morari M. (1982). Internal model control. A unifying review and some new results, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 21, 308-323.
- [11] Morari M., & Zafiriou E. (1989). Robust Process Control, Prentice Hall.
- [12] Garcia C. E., & Morari M. (1985). Internal model control 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 24, 484-494.
- [13] Tarakanath K., Patwardhan S., & Agarwal V. (2014). Internal model control of dc-dc boost converter exhibiting non-minimum phase behavior, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bombay, India, 1-7.
- [14] Sun X., Shi Z., Chen L., & Yang Z. (2016). Internal Model Control for a Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Inverse System Method, IEEE Transactions on Energy Conversion, 31(4), 1539-1548.
- [15] Liu G., Chen L., Zhao W., Jiang Y., & Qu L. (2013). Internal Model Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Support Vector Machine Generalized Inverse, IEEE Transactions Industrial Informatics, 9(2), 890-898.
- [16] Rashid M. H. (2011). Power Electronics Handbook Devices, Circuit, and Applications (3rd Ed.), Elsevier.
- [17] Middlebrook R., & Cuk S. (1976). A general unified approach to modelling switching converter power stages, IEEE Power Electronic Specialists Conference, 18-34.
- [18] Polsky T., Horen Y., Bronshtein S., & Baimel D. (2018). Transient and Steady-State Analysis of a SEPIC Converter by an Average State Space Modelling, IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, 211-215.

Fleet Type Planning for Private Airline Transportation After Covid-19

Raziye KILIÇ¹  Özge ALBAYRAK ÜNAL¹  Burak ERKAYMAN^{1*} 

¹Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Ataturk University, 25240 Erzurum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/09/2022
Revision: 23/11/2022
Accepted: 28/12/2022

Keywords

Private Airline
Transportation
Fleet Type Planning
Machine Learning
SVM
GPR
Ensemble Learning
Regression Trees

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/09/2022
Düzeltilme: 23/11/2022
Kabul: 28/12/2022

Anahtar Kelimeler

Özel Havayolu
Taşımacılığı
Filo Türü Planlama
Makine Öğrenmesi
DVM
GSR
Topluluk Öğrenme
Regresyon Ağaçları

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the number of aircraft types was estimated using the attributes determined for a private airline company, and it is given as a graphical summary below. / Bu çalışmada özel bir havayolu şirketi için belirlenen öznitelikler kullanılarak uçak türü sayısı tahmini yapılmıştır ve aşağıda grafiksel özet olarak verilmiştir.

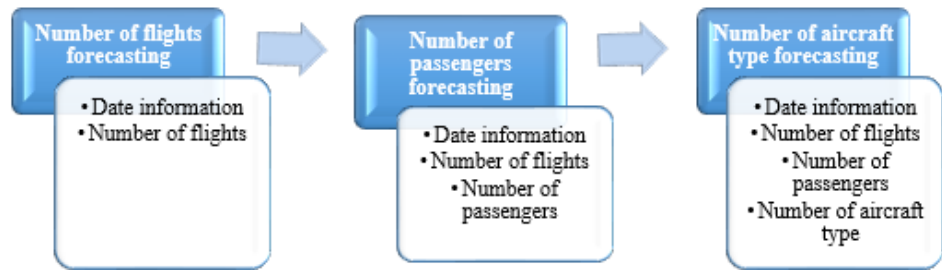


Figure A. The areas where the forecast work is applied and the features used / **Şekil A.** Tahmin çalışmasının uygulandığı alanlar ve kullanılan özellikler

Highlights (Önemli noktalar)

- A forecast study using machine learning methods was conducted to provide accurate flight schedules for a private airline company in the future. / Gelecekte özel bir havayolu şirketi için doğru uçuş programları sağlamak üzere makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak bir tahmin çalışması yapılmıştır.
- Support Vector Machines, Gaussian Process Regression, Regression Trees, and Ensemble Learning models were compared for the forecasting study. / Tahmin çalışması için Destek Vektör Makineleri, Gauss Süreci Regresyon, Regresyon Ağaçları ve Ensemble Öğrenme modelleri karşılaştırılmıştır.
- The number of flights is found to increase by approximately 7% in 2022 compared to the pre-pandemic period. / 2022 yılında uçuş sayısının pandemi öncesine göre yaklaşık %7 arttığı tespit edilmiştir.

Aim (Amaç): This study aimed to forecast future flight schedules for a private airline company, given the impact of the COVID-19 pandemic on air transportation. / Bu çalışma, COVID-19 salgınının hava taşımacılığı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, özel bir havayolu şirketi için gelecekteki uçuş programlarını tahmin etmeyi amaçlamıştır.

Originality (Özgünlük): This study uses machine learning to forecast future flight schedules for a private airline company, providing valuable insights for strategic planning and decision-making in the industry. The analysis of COVID-19's impact on air transportation and the application of advanced analytical techniques demonstrate the potential for future research in aviation. / Bu çalışma, özel bir havayolu şirketinin gelecekteki uçuş programlarını tahmin etmek için makine öğrenimini kullanmakta ve sektörde stratejik planlama ve karar verme için değerli bilgiler sağlamaktadır. COVID-19'un hava taşımacılığı üzerindeki etkisinin analizi ve gelişmiş analitik tekniklerin uygulanması, havacılıkta gelecekteki araştırmaların potansiyelini göstermektedir.

Results (Bulgular): Contrary to commercial airlines, private airline transportation showed an increase in customer demand due to the minimization of personal contact. In addition, results predict a 7% increase in the number of flights in 2022 compared to the pre-pandemic period. / Ticari havayollarının aksine özel havayolu taşımacılığı, kişisel temasın en aza indirilmesi nedeniyle müşteri talebinde artış göstermiştir. Ayrıca sonuçlar, 2022 yılı için uçuş sayısında pandemi öncesine göre %7'lik bir artış öngörmektedir.

Conclusion (Sonuç): This study provides insights for fleet planning using machine learning methods to predict future flight schedules for a private airline company and contributes to the air transport industry. / Bu çalışma, özel bir havayolunun şirketinin gelecekteki uçuş programlarını tahmin etmek için makine öğrenimi yöntemlerini kullanarak filo planlaması için içgörü sağlar ve hava taşımacılığı endüstrisine katkıda bulunmaktadır.



Fleet Type Planning for Private Airline Transportation After Covid-19

Raziye KILIÇ¹ Özge ALBAYRAK ÜNAL¹ Burak ERKAYMAN^{1*}

¹Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Ataturk University, 25240 Erzurum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/09/2022
Revision: 23/11/2022
Accepted: 28/12/2022

Keywords

Private Airline
Transportation
Fleet Type Planning
Machine Learning
SVM
GPR
Ensemble Learning
Regression Trees

Abstract

The global impact of the COVID-19 pandemic has done great damage to air transportation. Demand for airline transportation has declined for reasons such as quarantine practices by countries, curfews, the economic recession, and the transfer of meetings to digital platforms. This situation has also led to a change in individuals' preferences for air transport. The most noticeable change in air transport is the tendency of individuals to use air transport privately to minimize the health risks that face-to-face contact can pose. Individuals who avoid commercial air transport where public transportation is available have shifted to private airline transportation. For these reasons, a forecast study was conducted in this study so that a private airline could provide accurate flight schedules in the future. For the forecast study, the number of aircraft types for 2022 was determined by obtaining data on the number of aircraft by passenger capacity, the number of flights, and the number of passengers for 2019-2021 from the airline company. Support Vector Machines (SVM), Gaussian Process Regression (GPR), Regression Trees, and Ensemble Learning models from machine learning methods were used for the forecasting study. The performance evaluation of the models used was compared. The model results with the highest performance evaluation were used. According to the results obtained, it has been found that there will be an increase of approximately 7% in the number of flights for 2022 compared to the pre-pandemic period. The findings provided important information for the company's future fleet planning.

Covid-19 Sonrası Özel Havayolu Taşımacılığı İçin Filo Türü Planlaması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/09/2022
Düzeltilme: 23/11/2022
Kabul: 28/12/2022

Anahtar Kelimeler

Özel Havayolu
Taşımacılığı
Filo Türü Planlama
Makine Öğrenmesi
DVM
GSR
Topluluk Öğrenme
Regresyon Ağaçları

Öz

COVID-19 salgınının küresel etkisi hava taşımacılığına büyük zarar vermiştir. Ülkelerin karantina uygulamaları, sokağa çıkma yasakları, ekonomik durgunluk, toplantıların dijital platformlara taşınması gibi nedenlerle havayolu taşımacılığına olan talep azalmıştır. Bu durum bireylerin hava taşımacılığına yönelik tercihlerinin de değişmesine neden olmuştur. Hava taşımacılığındaki en dikkat çekici değişim, bireylerin yüz yüze temasıyla oluşabilecek sağlık risklerini en aza indirmek için hava taşımacılığını özel olarak kullanma eğilimidir. Toplu taşımanın mevcut olduğu yerlerde ticari hava taşımacılığında kaçınan bireyler, özel havayolu taşımacılığına yönelmiştir. Bu nedenlerle, bu çalışmada özel bir havayolu şirketinin gelecekte doğru uçuş programları sağlayabilmesi için bir tahmin çalışması yapılmıştır. Tahmin çalışması için havayolu şirketinden 2019-2021 yılları için yolcu kapasitesine göre uçak sayısı, uçuş sayısı ve yolcu sayısı verileri temin edilerek 2022 yılı için uçak tipi sayısı belirlenmiştir. Tahmin çalışması için makine öğrenmesi yöntemlerinden Destek Vektör Makineleri (DVM), Gauss Süreç Regresyonu (GSR), Regresyon Ağaçları ve Topluluk Öğrenme modelleri kullanılmıştır. Kullanılan modellerin performans değerlendirilmesi karşılaştırılmıştır. En yüksek performans değerlendirmesine sahip model sonuçları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 2022 yılı için uçuş sayılarında pandemi öncesi döneme göre yaklaşık %7'lik bir artış olacağı tespit edilmiştir. Bulgular, şirketin gelecekteki filo planlaması için önemli bilgiler sağlamıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Nowadays, air transport is frequently used by millions of people because it offers significant advantages compared to other means of transport, such as safety, reliability, comfort, accessibility, and speed. Developments in information and communication technology infrastructure, factors

influencing supply and demand, the search for competition, and differentiation in individual behavior are increasing interest in air transportation. The use of air transport, especially for business travel, makes it one of the most important components of this sector. The improvement of this system shows that it can significantly affect the development of the aviation industry. Considering

the current competition in aviation and the factors that influence this sector, this area of study attracts the attention of researchers.

The aviation industry has experienced many crises over the past two decades, each with its own characteristics and economic impact. The COVID-19 pandemic that occurred in 2019 affected many sectors, especially the aviation sector, and caused severe damage. The aviation sector was the sector where countries imposed restriction due to the high number of domestic and international passengers and as the preferred mode of transportation. With the onset of the pandemic, the number of passengers and flights in 2020 fell short of the numbers projected before the pandemic. The number of passengers on international flights between January and April 2020 was about 23 million people in the Americas, 20 million people in Spain, and 18 million people in China. In Turkey, this figure was about nine million people below the projected number [1].

Demand forecasting is a very important issue in the aviation industry. Forecasts are a management tool that companies can use to decide what needs to be done to achieve their goals, and they are an indispensable part of planning. These forecasts, made to eliminate future uncertainties in the daily growing air traffic, ensure that all kinds of problems and requirements are determined in advance. Accurate future forecasts help airline managers plan effectively and efficiently. Forecast results that are high cause demand to exceed supply, while at the same time increasing administrative costs, labour and engineering costs, and other related costs. When forecast results are low, it means there is less demand than supply. In this case, the competence of airline managers is strengthened, which leads to stress and lowers employee motivation [2].

In the aviation industry, forecasting passenger demand is an essential element for airline managers to make appropriate operational plans. With the increasing demand for passengers, the number of flights is also increasing day by day. Forecasting the number of flights for a given period allows the airline to plan future more accurately and save many costs. In addition, many different criteria are considered in the selection of the aircraft type, and the most appropriate aircraft for the fleet structure, planned program, and corporate interests are selected. This selection requires a holistic approach that provides flexibility in fleet planning and operations by addressing the interests of both airlines companies and passengers.

There are numerous studies in the literature on passenger forecasting, flight forecasting, and fleet planning. Some of these studies are as follows: Atay et al. used artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system methods to forecasting passenger demand, cargo demand, and the domestic fleet for the coming years [3]. Efendigil and Eminler analyzed the studies in the literature between 1950 and 2015 on air passenger transportation forecasting according to the technique used, the year and the country. The results showed that the Artificial Neural Network (ANN) method gave the best results [4]. Jiang et al. developed a hybrid approach using a combination of ensemble empirical mode decomposition and gray support vector machine models for short-term high-speed train ridership estimation [5]. Sun et al. developed a new hybrid model called Wavelet-SVM to predict passenger flows in the Beijing subway. They concluded that wavelet-SVM has the best prediction performance compared to the most advanced methods [6]. Jafari used both traditional and artificial intelligence methods to examine the impact of COVID-19 on demand for U.S. domestic passenger demand [7]. Marie-Sainte et al. proposed two new hybrid forecasting methods, particle swarm optimization-based linear regression and firefly algorithm-based linear regression for airline demand forecasting [8]. Dursun and Toraman used the long short-term memory method to forecast the number of passengers at Elazığ Airport. The results showed that the proposed approach helps to forecast the passenger numbers of airlines [9]. Pandit and Akhtar used neural networks in aircraft selection for fleet planning. The model ANN provided a good solution without the time constraints and complexity of the method [10]. Wild et al. compared the performance of some machine learning algorithms with a multiple linear regression model in modeling air transport demand. The results showed that artificial neural networks and neuro-fuzzy inference system methods performed the best [11]. Bao et al. proposed an SVM modeling system based on empirical mode decomposition, which includes a slope-based method for forecasting air passenger traffic. They concluded that the SVM outperforms methods such as Holt-Winters and autoregressive integrated moving average [12]. Guo et al. combined a Copula-based simulation with a regression tree to forecast passenger flows at an airport. The results showed that the presented two-stage forecasting system more accurately predicts both passenger flows and connection times [13]. Laik et al. developed a decision tree for forecasting airline passenger traffic using one year of real data. As a result of the model, a mean square error of 3%-12% was obtained, proving the usefulness of the

model in the real world [14]. Wilson and Adams used 96 months of airline passenger data to forecast the number of passengers for 4 years using the GPR method [15].

The purpose of this study is to forecast the number of flights, passenger demand, and number of aircraft types according to passenger capacity for the coming years of a private airline transportation company. Using data on the number of flights, the number of passengers, and the number of aircraft types (0-05, 06-10, 10+ passenger capacity) of airline company, according to weekly passenger numbers were used to determine how many of which aircraft type should be chartered. Machine learning models were used in the study.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

Airline companies use predictive analytics to forecast future customer demand based on information about past travel. Predictive analytics is used to determine the likely future outcome of an event or the probability of a situation occurring [16]. Predictive analytics is a term used mainly in statistical and analytical techniques. This term includes techniques such as statistics, machine learning, data mining, optimization. Predictive analytics forecasts the future by analyzing current and past data [17]. Figure 1 shows the process of predictive analytics. The first step is to collect the raw data. The second step is the section where reporting is organized and data analysis is performed. The third step is the more descriptive part that helps you understand what is going on and identify business issues and opportunities. The

fourth step is looking for the answer to the question "What will happen in the future?" by using historical data to predict the future [18].

Airline companies can use past travel information to determine the number of aircraft they will need in the future and plan ahead for their fleet. In this way, they can gain a competitive advantage over other airlines by increasing customer satisfaction in their operations.

2.1. Machine Learning (Makine Öğrenmesi)

Machine learning is self-learning and based on algorithms, i.e., the system learns from experience. In machine learning, the system learns the pattern from the data given to it as input and responds with output to what it learns. It essentially uses a statistical learning algorithm that learns on its own and improves without human intervention [19]. In short, machine learning is one of the fastest growing data-driven technical fields, located at the intersection of computer science and statistics, and is at the core of artificial intelligence and data science [20]. The rapid adoption of machine learning methods that leverage Big Data in technology, science, and commerce is leading to more evidence-based decision making in many different fields such as healthcare, manufacturing, education, financial modeling, military, and marketing [21]. Machine learning has become one of the preferred methods among researchers in recent years to intelligently analyze data and finding solutions to complex real-world problems. There are many machine learning methods such as SVM, decision trees, Bayesian learning, k-means clustering, association rule learning, regression, and neural networks [22].

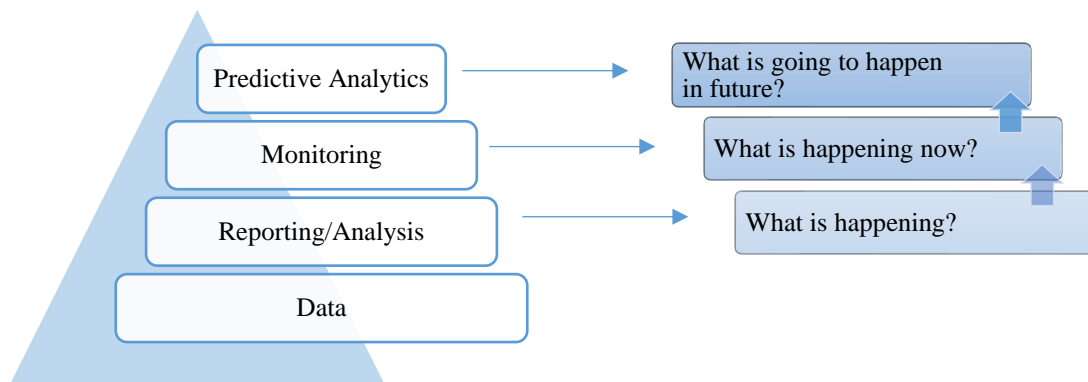


Figure 1. Predictive analytics process (Tahmine dayalı analitik süreci)

Support vector regression (SVR) is an important branch of SVM, which is one of the machine learning methods. It minimizes the optimal hyperplane searched in SVR regression and the total deviation between the sample points and the

hyperplane [23]. SVR formulates an optimization problem to learn a regression function that maps from the input predictor variables to the observed output values of the response. SVR strikes a balance between model complexity and prediction error and

has good performance in processing high-dimensional data [24]. Based on statistical learning theory, the method was designed to solve classification and regression problems, and then SVR was developed for prediction [25].

The GPR model is a nonparametric kernel-based probability model [26]. Gaussian processes are defined as a family of stochastic processes that provide a flexible, nonparametric tool for modeling data [27]. The expression of a nonparametric model naturally adapts to the complexity of the data. Therefore, this type of model has the advantage of being more flexible than parametric models. The Bayesian approach allows the GPR to incorporate uncertainty forecast directly into the forecast, so that a model can accept different probabilities for future probable values instead of specifying a single predicted value [28]. The GPR model is a method that is well suited for small data sets and is capable of measuring forecast uncertainty. It is suitable for solving nonlinear regression problems. GPRs are used to predict multiple target values in statistical modeling [29].

Ensemble Learning is a machine learning model that consists of a set of learners called Base Learning. The process of learning from base learners is called "meta-learning" [30]. Most ensemble methods result in a homogeneous ensemble by using a single-base learning algorithm to generate learners of the same type. There are also some methods that use multiple learning algorithms to generate heterogeneous groups [31]. Ensemble learning requires both feature selection and parameter optimization. Once the appropriate features are selected, the performance of the ensemble learning model that combines the candidate learning algorithms can be maximized through parameter optimization [32].

Regression trees methods are decision tree algorithms that examine the relationships between dependent and independent variables and summarize the results in a tree diagram [29]. There are three important elements in the tree structure: nodes represent objects, deviation paths represent the probability of attribute values, and each leaf node corresponds to the value of the entity represented by the path from the root node to the leaf node [33]. The regression trees are the inverse of the decision tree and is suitable for solving regression problems. It does not predict labels but a continuous exchange value [34]. This modeling method is a flexible technique without extensive parametric tuning. Regression trees can use

different methods to calculate the node separations and determine the depth of the tree [35].

3. CASE STUDY (VAKA ÇALIŞMASI)

In this study, the problem of forecasting the number of aircraft types of an airline company is discussed. The company provides transportation services to its customers by private aircraft. The airline company charters the types of aircraft it serves from different aircraft rental companies depending on the number of passengers. For this reason, it is very important for the company's flight planning to determine which type of aircraft to serve with for future periods based on customer demand. The company charters three different aircraft types with a capacity of 0-05, 06-10 and 10+ passengers. These aircraft types are determined by the number of passengers to be carried. For example, for a request of 12 passengers, an aircraft with a capacity of 10+ passengers must be chartered. However, if there is a request of 3 passengers, it is necessary to organise an aircraft with a capacity of 0-05 passengers. If it cannot organise an aircraft with a capacity of 0-05 passengers, it can charter aircraft with a capacity of 06-10 and 10+ passengers in order not to refuse the passenger request.

3.1. Data Set and Feature Selection (Veri Seti ve Öznitelik Seçimi)

In this study, actual data from a private airline were used to forecast aircraft type based on passenger capacity. Data on aircraft type by number of flights, number of passengers and passenger capacity between 2019 and 2021 were obtained from the airline and analyzed weekly. The forecasts in the study were made at three different points. First, the number of flights was forecast, using the data of the date and the number of flights as features. Second, the number of passengers was forecast. In forecasting the number of passengers, the data of the date, the number of flights and the number of passengers were used as features. Finally, the data of the date, number of flights, number of passengers, and aircraft type by passenger capacity are used as features for forecasting aircraft type by passenger capacity. The features used in the forecast study are shown in Figure 2.

The data set used for the study was divided into two groups: Test and Training dataset. The training data covers the years 2019-2021, while the test data covers the years 2022. After the model was trained with the training data, forecasting was made with the test data. These processes were performed in the MATLAB software environment. MATLAB

statistics and the Regression Learner App in the Machine Learning Toolbox were used to forecast data using machine learning. High-performance models were selected using Regression Trees, Linear Regression, Ensemble Learning, Support Vector Regression, and Gaussian Process Regression, which are machine learning methods. In machine learning studies, many different statistical ratios (coefficient of determination, mean absolute percentage error, mean absolute error, mean square error, root mean square error, etc.) are

used to evaluate the performance of the model. The coefficient of determination (R^2) provides more informative and accurate results because it has no limits of interpretability compared to other statistical ratios in determining the quality of performance [36]. The R^2 value expresses the relationship between actual values and predicted values. The R^2 value takes a value between 0-1, and the closer this value is to 1, the more accurate and sensitive the model becomes [37]. For this reason, the R^2 value was used in this study.

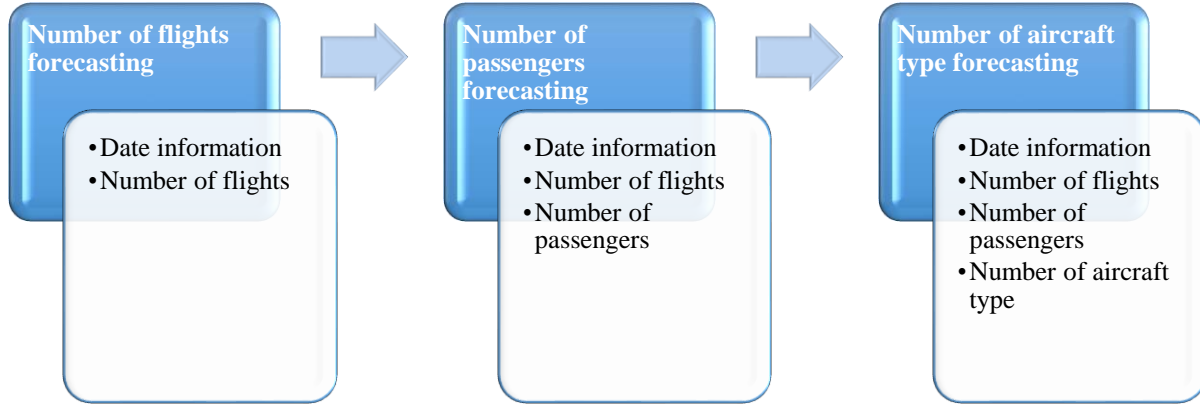


Figure 2. The areas where the forecast work is applied and the features used (Tahmin çalışmasının uygulandığı alanlar ve kullanılan özellikler)

3.2. Forecasting the Number of Flights and Passengers (Uçuş ve Yolcu Sayısının Tahmini)

In the flight count forecasting phase of the study, the model with better results was selected by training machine learning models with the dataset created, and the results of this model were used. The machine learning models used are SVM, GPR, Ensemble Learning, and Regression Trees. The attributes used for flight forecast are the week, month, year, and weekly flight number data. The flight number data were used as output parameters. The results obtained with the methods used are shown in Table 1. According to these results, the model with the best R^2 value was determined as the GPR.

Table 1. Results of the performance evaluation for flight forecasting (Uçuş tahmini için performans değerlendirmesinin sonuçları)

Methods	R^2
SVM	0.83
Ensemble Learning	0.78
GPR	0.86
Regression Trees	0.76

In the passenger number forecasting phase, the model with better results was selected by training machine learning models with the created dataset, and the results of this model were used. The machine learning models used are SVM, GPR, Ensemble Learning and Regression Trees. The attributes used for passenger forecasting are week, month, year, and the number of weekly flights and passengers. Passenger number data was used as output parameters. The results obtained with the methods used are shown in Table 2. Based on these results, the model with the best R^2 value was determined as the GPR.

Table 2. Results of the performance evaluation for passenger forecasting (Yolcu tahmini için performans değerlendirmesinin sonuçları)

Methods	R^2
SVM	0.95
Ensemble Learning	0.92
GPR	0.96
Regression Trees	0.93

3.3. Forecasting the Number of Aircraft Types by Passenger Capacity (Yolcu Kapasitesine Göre Uçak Türü Sayısının Tahmini)

In the forecast phase of the number of aircraft types according to the passenger capacity of the study, the model with better results was selected by training the machine learning models with the created dataset, and the results of this model were used. The machine learning models used are SVM, GPR, Ensemble Learning and Regression Trees. The features used to forecast the number of aircraft types according to passenger capacity were created separately for week, month, year, and number of weekly flights, number of passengers, and number of aircraft types (0-05, 06-10, 10+). This is shown in Table 4, 5, 6. The data on the number of aircraft types are used as output parameters. The results obtained with the methods used are shown in Table 3. The results show that SVM is the best model for forecasting the number of aircraft types for 0-05 and 06-10 passenger capacity, while GPR is the best model for forecasting the number of aircraft types for 10+ passenger capacity (see Figure 3, 4, 5).

Machine learning involves providing a known set of input data (observations) and known responses (tags) to the data. In figure 3-5, the blue dots show the number of aircraft types used in the past years to train the model. The yellow dots represent the forecasting results of the aircraft types obtained by training the model. The red lines show the difference between the forecasted values and the actual observed values, i.e., the error. The figures show the 156-week forecast results. It observed that the demand for about 100-weekly flights is more fluctuates. The fluctuating demand observed in 2019 is due to the lack of regular customer behavior in private airline transportation. In the first half of 2020, there was a sudden decrease in demand with the occurrence of the COVID-19 pandemic. In the second half of 2020, demand for private airline transportation increased of customers who avoid public transportation. After the 100th week, there is a regularity is observed in the demand of customers for special air transportation. This is because customer behavior has changed due to the pandemic and demand has become more regular.

Table 3. Results of the performance evaluation for forecasted aircraft type (Uçak türü tahmini için performans değerlendirmesinin sonuçları)

Methods	R ²	R ²	R ²
	(0-05)	(06-10)	(10+)
SVM	0.35	0.95	0.88
Ensemble Learning	0.33	0.92	0.86
GPR	0.32	0.94	0.89
Regression Trees	0.18	0.92	0.82

Table 4. Features used in the application for 0-05 passenger capacity (0-05 yolcu kapasitesi için uygulamada kullanılan öznitelikler)

Week	Mouth	Year	Number of Flights	Number of Passengers	Number of Aircraft Types (0-05)
1	1	2019	56	249	1
2	1	2019	60	229	4
3	1	2019	75	302	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2020	50	255	0
2	1	2020	80	296	0
3	1	2020	101	366	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2021	92	357	2
2	1	2021	92	357	2
3	1	2021	91	356	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

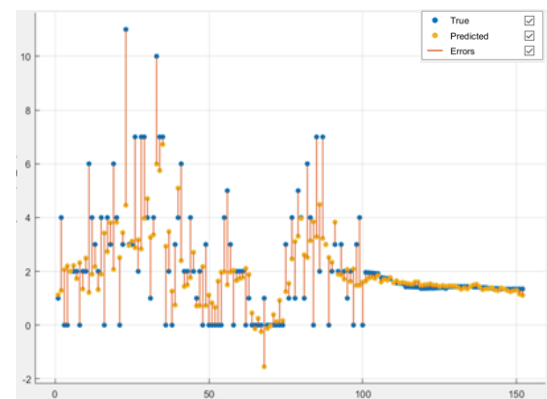


Figure 3. Best model results (0-05) (En iyi model sonuçları (0-05))

Table 5. Features used in the application for 06-10 passenger capacity (06-10 yolcu kapasitesi için uygulamada kullanılan öznelilikler)

Week	Mouth	Year	Number of Flights	Number of Passengers	Number of Aircraft Types (06-10)
1	1	2019	56	249	31
2	1	2019	60	229	36
3	1	2019	75	302	45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2020	50	255	29
2	1	2020	80	296	49
3	1	2020	101	366	49
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2021	92	357	54
2	1	2021	92	357	54
3	1	2021	91	356	54
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

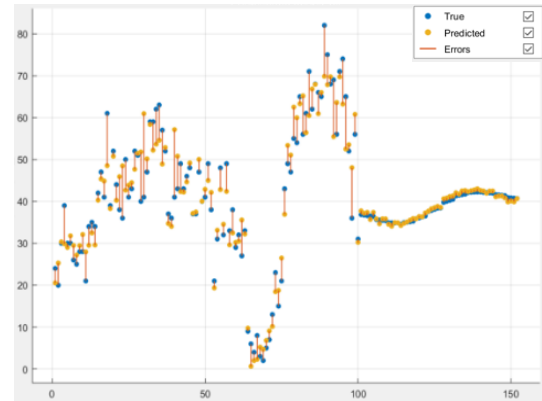


Figure 4. Best model results (06-10) (En iyi model sonuçları (06-10))

Table 6. Features used in the application for 10+ passenger capacity (10+ yolcu kapasitesi için uygulamada kullanılan öznelilikler)

Week	Mouth	Year	Number of Flights	Number of Passengers	Number of Aircraft Types (10+)
1	1	2019	56	249	24
2	1	2019	60	229	20
3	1	2019	75	302	30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2020	50	255	21
2	1	2020	80	296	31
3	1	2020	101	366	48
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	2021	92	357	37
2	1	2021	92	357	37
3	1	2021	91	356	37
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

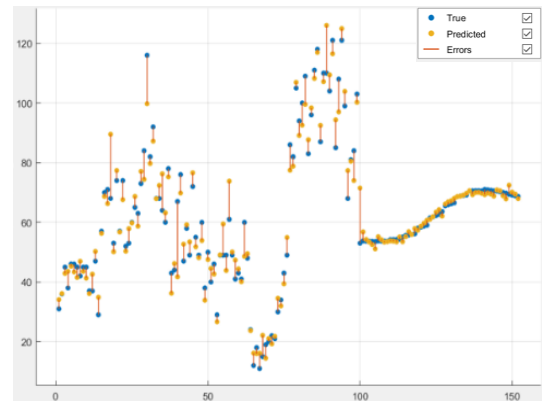


Figure 5. Best model results (10+) (En iyi model sonuçları (10+))

4. EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSSEL BULGULAR)

This study was carried out to forecast the number of aircraft types according to the passenger capacity of an airline company for 2022. The performance evaluation was assessed using the R^2 value. For the performance of the model to be optimal, the R^2 value should be very close to 1. The study first estimated the number of weekly flights for 2022. The results show that the R^2 value is 0.86. Then, the weekly number of passengers for 2022 was predicted. Data on the number of weekly flights were added when forecasting passenger numbers. The results show that the R^2 value is 0.96. Based on the R^2 values found, it can be said that increasing

the number of features is a factor that affects the accuracy of the model. Finally, the number of aircraft types was forecasted according to the passenger capacity. Given that the company leases three various types of aircraft with different capacity, it has been forecasted how many different types of aircraft should be chartered per week. For this purpose, the data of date information, the number of weekly flights, the number of weekly passengers and the weekly aircraft type are used. According to the obtained results, R^2 was 0.35 for the aircraft with capacity of 0-05 passengers, R^2 was 0.95 for the aircraft with capacity of 06-10 passengers, and R^2 was 0.89 for the aircraft with capacity of 10+ passengers. The performance evaluation of the aircraft type with a capacity of 0-

5 passengers was found to be lower than the others. Customer demand for aircraft type with a capacity of 0-5 passengers is not regular. When examination of historical data shows that this type of aircraft is used less frequently. In most of the weeks examined, there is no flight by this type of aircraft. As a result of the lack of flight data, machine learning algorithms cannot create an accurate

pattern between train and test data. By increasing the number of features, the model can become more complex and the performance evaluation can be improved. Figure 6 shows that in 2022, the airline is expected to charter 105 aircraft with a capacity of 0-05 passengers, 3853 aircraft with a capacity of 06-10 passengers, and 1702 aircraft with a capacity of 10+ passengers.

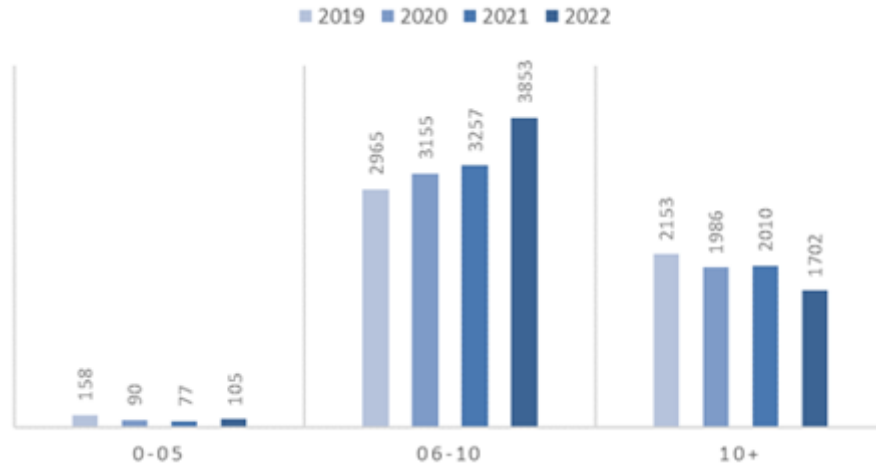


Figure 6. Forecasting results (Tahmin sonuçları)

5. DISCUSSION AND CONCLUSION (TARTIŞMA VE SONUÇ)

With the advent of the global COVID-19 pandemic, there was a sudden decline in the number of airline passengers [38]. Travel demand has declined due to quarantine practices for high-risk countries, personal health risks, virtual platform meetings, environmental concerns, and the recession in commercial issues [39]. In 2020, the international travel market experienced significant revenue losses due to travel restrictions imposed on approximately 96% of destinations [40]. Due to the social distancing measures taken because of the COVID-19 pandemic, people's travel behavior has changed. Travel by shared transport, which increases the risk of contact with other users, has been shown to decrease [41]. During this time, when private transportation was preferred over public transportation, a transition from commercial to private aviation was evident in the U.S. aviation industry [42]. In our study, the number of aircraft types was estimated using data from a private airline company. Examination of the data reveals that the sudden declines in commercial airline transportation for 2020 and 2021 did not occur in private airline transportation. On the contrary, while 2020 shows an almost similar performance to the previous year, customer demand in 2021 increases

compared to the previous two years. Due to the minimization of personal contact, the demand for private airline transportation has increased rather than the low demand for commercial passenger transportation. The forecast for 2022 projects an increase of about 7% in the number of flights compared to the pre-pandemic period.

The recession caused by the COVID-19 pandemic was felt in the commercial airline industry as well as in many other sectors. It has been observed that people prefer private means of transportation to shared transportation vehicles in order to protect themselves from the risks of the pandemic. In this study, a forecast of aircraft type chartering for 2022 according to passenger capacity was made using flight data from a private airline company for the previous three years. Data on the number of weekly flights, number of passengers, and number of aircraft types (0-05, 06-10, 10+) were used for the forecast study. Among these models, the support vector regression and Gaussian process regression models provided results with higher accuracy than other models. According to the obtained results, it is expected that airline companies can contribute to the planning of fleet type and the associated costs, personnel and other expenses.

To increase accuracy in future studies, better forecast can be made using the LSTM model, which is one of the deep learning methods. In addition, other factors that affect the number of flights can be identified and used as a feature. By comparing the forecast study made at the end of 2022 with the companys' actual data, it can be ensured that the company will get new results for 2023, which it can plan on a weekly basis. In addition, the behavior of passenger demand for private airline transportation can be modeled in the coming years as the impact of the COVID-19 pandemic gradually diminishes.

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)

Raziye KILIÇ: She conducted the applications, analyzed the results and performed the writing process in the article.

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

Özge ALBAYRAK ÜNAL: She conducted the applications, analyzed the results and performed the writing process in the article.

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

Burak ERKAYMAN: He conducted the process of providing the data, reviewing the results, and writing in the article.

Verilerin sağlanması, sonuçların gözden geçirilmesi ve makalenin yazılması 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] Meriç, S., COVID-19'un Dünya ve Türk sivil havacılık sektörüne ekonomik etkileri. Atlas Journal, 2021. 7(40): p. 1699-1710.

[2] Adeniran, A. and M. Stephens, The dynamics for evaluating forecasting methods for international air passenger demand in Nigeria. Journal of tourism & hospitality, 2018. 7(4): p. 1-11.

[3] Atay, M., Y. Eroğlu, and S. Ulusam Seçkiner, Yapay sinir ağları ve adaptif nörobülünlik sistemler ile 3. İstanbul havalimanı talep tahmini ve türk hava yolları iç hat filo optimizasyonu. Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers), 2019. 30(2).

[4] Efendigil, T. and Ö.E. Eminler, Havacılık sektöründe talep tahminin önemi: yolcu talebi üzerine bir tahmin modeli. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 2017. 12: p. 14-30.

[5] Jiang, X., L. Zhang, and X.M. Chen, Short-term forecasting of high-speed rail demand: A hybrid approach combining ensemble empirical mode decomposition and gray support vector machine with real-world applications in China. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014. 44: p. 110-127.

[6] Sun, Y., B. Leng, and W. Guan, A novel wavelet-SVM short-time passenger flow prediction in Beijing subway system. Neurocomputing, 2015. 166: p. 109-121.

[7] Jafari, N., The chaos on US domestic airline passenger demand forecasting caused by COVID-19. International Journal of Business Forecasting and Marketing Intelligence, 2022. 7(3): p. 241-258.

[8] Marie-Sainte, S.L., T. Saba, and S. Alotaibi, Air passenger demand forecasting using particle swarm optimization and firefly algorithm. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2019. 16(9): p. 3735-3743.

[9] Dursun, Ö.O. and S. Toraman, Uzun kısa vadeli bellek yöntemi ile havayolu yolcu tahmini. Journal of Aviation, 2021. 5(2): p. 241-248.

[10] Pandit, P.K. and M.A. Akhtar Hasin. Business model of aircraft fleet planning using ANN in the road to a digitalized supply chain management: smart and digital solutions for supply chain management. Proceedings of the Hamburg International Conference of

- Logistics (HICL), Vol. 25. 2018. Berlin: epubli GmbH.
- [11] Wild, G., et al. Machine learning for air transport planning and management. in AIAA AVIATION 2022 Forum. 2022.
- [12] Bao, Y., T. Xiong, and Z. Hu, Forecasting air passenger traffic by support vector machines with ensemble empirical mode decomposition and slope-based method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012. 2012.
- [13] Guo, X., Y. Grushka-Cockayne, and B. De Reyck, Forecasting airport transfer passenger flow using real-time data and machine learning. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2021.
- [14] Laik, M.N., M. Choy, and P. Sen. Predicting airline passenger load: A case study. in 2014 IEEE 16th Conference on Business Informatics. 2014. IEEE.
- [15] Wilson, A. and R. Adams. Gaussian process kernels for pattern discovery and extrapolation. in *International conference on machine learning*. 2013. PMLR.
- [16] Mishra, N. and S. Silakari, Predictive analytics: a survey, trends, applications, oppurtunities & challenges. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2012. 3(3): p. 4434-4438.
- [17] Kumar, V. and M. Garg, Predictive analytics: a review of trends and techniques. *International Journal of Computer Applications*, 2018. 182(1): p. 31-37.
- [18] Indriasari, E., et al. Application of predictive analytics at financial institutions: A systematic literature review. in 2019 8th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI). 2019. IEEE.
- [19] Sharma, N., R. Sharma, and N. Jindal, Machine learning and deep learning applications-a vision. *Global Transitions Proceedings*, 2021. 2(1): p. 24-28.
- [20] Zhang, L., et al., A review of machine learning in building load prediction. *Applied Energy*, 2021. 285: p. 116452.
- [21] Jordan, M.I. and T.M. Mitchell, Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 2015. 349(6245): p. 255-260.
- [22] Nguyen, G., et al., Machine learning and deep learning frameworks and libraries for large-scale data mining: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 2019. 52(1): p. 77-124.
- [23] Quan, Q., et al., Research on water temperature prediction based on improved support vector regression. *Neural Computing and Applications*, 2020: p. 1-10.
- [24] Zhang, F. and L.J. O'Donnell, Support vector regression, in *Machine Learning*. 2020, Elsevier. p. 123-140.
- [25] Çoban, F. and L. Demir, Yapay sinir ağları ve destek vektör regresyonu ile talep tahmini: Gıda işletmesinde bir uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2021. 23(67): p. 327-338.
- [26] Dewangan, C.L., S. Singh, and S. Chakrabarti, Combining forecasts of day-ahead solar power. *Energy*, 2020. 202: p. 117743.
- [27] Fairbrother, J., et al., GaussianProcesses. jl: A Nonparametric Bayes package for the Julia Language. *arXiv preprint arXiv:1812.09064*, 2018.
- [28] Liu, K., et al., Gaussian process regression with automatic relevance determination kernel for calendar aging prediction of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. 16(6): p. 3767-3777.
- [29] Mehmet, A. and G.A. Doğansoy, Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak e-perakende sektörüne yönelik talep tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2022. 37(3): p. 1325-1340.
- [30] Zounemat-Kermani, M., et al., Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 2021. 598: p. 126266.
- [31] Zhou, Z.-H., *Ensemble methods: foundations and algorithms*. 2012: CRC press.
- [32] Kapucu, C. and M. Çubukçu, Fotovoltaik sistemlerde topluluk öğrenmesi temelli hata

- tespiti. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 2019. 12(2): p. 83-91.
- [33] Zulkifly, Z., K.A. Baharin, and C.K. Gan, Improved Machine Learning Model Selection Techniques for Solar Energy Forecasting Applications. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2021. 11(1): p. 308-319.
- [34] Gao, K., et al., Julia language in machine learning: Algorithms, applications, and open issues. *Computer Science Review*, 2020. 37: p. 100254.
- [35] Aguila-Torres, D.S., J.A. Galaviz-Aguilar, and J.R. Cárdenas-Valdez. Reliable comparison for power amplifiers nonlinear behavioral modeling based on regression trees and random forest. in *2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2022. IEEE.
- [36] Chicco, D., M.J. Warrens, and G. Jurman, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 2021. 7: p. e623.
- [37] Sevinç, A. and K. Buket, Derin öğrenme ve istatistiksel modelleme yöntemiyle sıcaklık tahmini ve karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2021(28): p. 1222-1228.
- [38] Suau-Sanchez, P., A. Voltes-Dorta, and N. Cugueró-Escofet, An early assessment of the impact of COVID-19 on air transport: Just another crisis or the end of aviation as we know it? *Journal of Transport Geography*, 2020. 86: p. 102749.
- [39] Wild, P., F. Mathys, and J. Wang, Impact of political and market-based measures on aviation emissions and passenger behaviors (a Swiss case study). *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021. 10: p. 100405.
- [40] Zhang, L., et al., The impact of COVID-19 on airline passenger travel behavior: An exploratory analysis on the Chinese aviation market. *Journal of Air Transport Management*, 2021. 95: p. 102084.
- [41] Ozbilen, B., K.M. Slagle, and G. Akar, Perceived risk of infection while traveling during the COVID-19 pandemic: Insights from Columbus, OH. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021. 10: p. 100326.
- [42] Sobieralski, J.B. and S. Mumbower, Jet-setting during COVID-19: Environmental implications of the pandemic induced private aviation boom. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2022. 13: p. 100575.

Investigating the effects of aggregate gradation on Marshall Parameters of bituminous hot mixtures

Deniz ARSLAN^{1*}  Hüseyin KÖSE² 

¹Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering Department, 42250, Selçuklu/KONYA

²Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering Department, 42250, Selçuklu/KONYA

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 10/01/2023
Accepted: 17/01/2023

Keywords

Binder Course
Aggregate Gradation
Marshall Design
Marshall Parameters

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 10/01/2023
Kabul: 17/01/2023

Anahtar Kelimeler

Binder Tabakası
Agrega Gradasyonu
Marshall Tasarımı
Marshall Parametreleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of aggregate gradation on bituminous hot mixture properties were investigated. Five different aggregate gradations were determined and Marshall design was performed with each of them. / Bu çalışmada, agregada gradasyonunun bitümlü sıcak karışım özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Beş farklı agregada gradasyonu belirlenmiş ve herbiri ile Marshall tasarımı yapılmıştır.

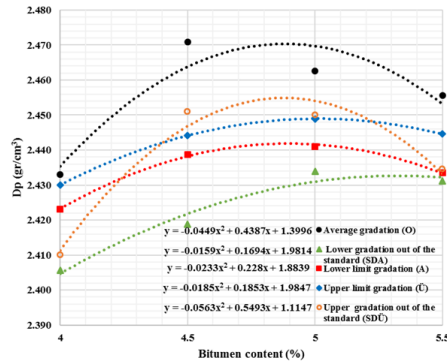


Figure A: Unit weight-gradation relationship / Şekil A: Birim ağırlık-gradasyon ilişkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Aggregate gradation envelope for binder course / Binder tabakası için agregada gradasyon zarfı
- In/Out of limit gradations / Limit içi/dışı gradasyonlar
- Effects of gradation on bituminous mixture properties / Bitümlü karışım özellikleri üzerinde gradasyon etkileri

Aim (Amaç): It was aimed to examine the effects of aggregate gradation on the physical properties of the bituminous hot mixtures. / Bitümlü sıcak karışımların fiziksel özellikleri üzerinde agregada gradasyonunun etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Bituminous hot mixture performance – aggregate gradation relationship and the effects of the gradation envelope defined for binder course on that relationship were experimentally analyzed. / Bitümlü sıcak karışım performansı - agregada gradasyonu ilişkisi ve binder tabakası için tanımlanan gradasyon zarfının bu ilişki üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir.

Results (Bulgular): The increase or decrease of aggregate particle size compared to the average gradation decreased D_p and V_f values while increased VMA and V_a values of the Marshall samples. / Agregada tane boyutunun ortalama gradasyona göre artması veya azalması Marshall numunelerinin D_p ve V_f değerlerini azaltırken VMA ve V_a değerlerini arttırmıştır.

Conclusion (Sonuç): The upward separation from the average values of the gradation envelope that is defined for the binder layer has the potential to increase the stability. A downward separation from the average values can said to cause negative effects in terms of flow, VMA and stability property of the bituminous mixtures. / Binder tabakası için tanımlanmış gradasyon zarfında ortalama değerlere kıyasla yukarı doğru ayrılmanın stabiliteyi artırma potansiyeli mevcuttur. Ortalama değerlerden aşağı doğru bir ayrılmanın bitümlü karışımların akma, VMA ve stabilite özellikleri bakımından olumsuz etkilere neden olduğu söylenebilir.



Agrega Gradasyonunun Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Deniz ARSLAN^{1*} Hüseyin KÖSE²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 10/01/2023
Kabul: 17/01/2023

Anahtar Kelimeler

Binder Tabakası
Agrega Gradasyonu
Marshall Tasarımı
Marshall Parametreleri

Öz

Bu çalışmada, agrega gradasyonunun bitümlü sıcak karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 2013 yılı Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesinde binder tabakası için tanımlanan gradasyon sınırları esas alınmıştır. Gradasyon sınırlarına ait ortalama, alt limit, üst limit değerleri ile birlikte alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen beş farklı agrega gradasyonu oluşturulmuş ve her biri için ayrı ayrı Marshall tasarımları yapılmıştır. Gradasyon sınırları dışındaki değerler, çalışma esnasında oluşabilecek gradasyon hatalarının bitümlü karışımda meydana getirebileceği performans değişimlerinin öngörülebilmesi amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir. Elde edilen test verilerine göre agrega gradasyonunun bitümlü sıcak karışımların stabilite, akma, birim ağırlık (Dp), hava boşluğu oranı (Vh), bitümle dolu boşluk oranı (Vf), agregalar arasındaki boşluk oranı (VMA) ve Marshall oranı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Agregada boyutunun ortalama gradasyona kıyasla artmasının veya azalmasının Dp ve Vf değerlerinde azalma, VMA ve Vh değerlerinde artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, gradasyonun üst limitine doğru stabilite değerlerinin arttığı görülmüştür.

Investigating the effects of aggregate gradation on Marshall Parameters of bituminous hot mixtures

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 10/01/2023
Accepted: 17/01/2023

Keywords

Binder Course
Aggregate Gradation
Marshall Design
Marshall Parameters

Abstract

In this study, it was aimed to investigate the effects of aggregate gradation on the physical properties of bituminous hot mixtures. Accordingly, the gradation limits defined for the binder course in 2013 Highway Technical Specification of Turkey was taken as basis. Five different aggregate gradations were generated as the average, the lower limit, and the upper limit values of the gradation limits together with shifting the lower and upper limits by 7%, and Marshall designs were applied on each of them. Values outside the gradation limits were included in the study in order to predict the performance changes in bituminous mixture due to the gradation errors that may occur during operation process. The effects of aggregate gradation on the stability, flow, unit weight (Dp), air void ratio (Vh), void filled with bitumen ratio (Vf), voids in mineral aggregate ratio (VMA) and Marshall quotient of bituminous hot mixtures were evaluated according to the test data obtained. It was determined that the increase or decrease in aggregate size compared to the average gradation generated a decrease in Dp and Vf values, and an increase in VMA and Vh values. Also, stability values were observed to be increased towards the upper limit of the gradation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aşınma, binder ve gerekli hallerde kullanılan bitümlü temel tabakaları, karayolu ulaşımını sağlayan yüksek standartlı esnek üstyapılarda kaplama tabakalarını oluştururlar. Her üç tabaka da bitümlü sıcak karışımlar ile inşa edilirler. Bitümlü

sıcak karışımlar, agregada ve bitümün plentte yüksek sıcaklıkta karıştırılmasıyla hazırlanır. Karışımın ağırlıkça yaklaşık olarak % 95'i agregadadır. Agreganın fiziksel özelliklerinin yanı sıra dane büyüklüğü dağılımı olarak tanımlanan gradasyonu, kaplama tabakasının özelliklerini yakından etkiler. Agregada grubunun sağlaması gereken gradasyon

özellikleri şartnamelerde kullanılacağı tabaka özelinde tanımlanmıştır. Farklı ülkelerde farklı tanımlamalar yapılmakla beraber çoğundaki ortak nokta, sağlanması gereken gradasyon özelliklerinin alt ve üst limitleri bulunan gradasyon aralığı halinde verilmiş olmasıdır. Agreganın bu aralığa uyum göstermesi şartname bakımından yeterlidir. Ancak, gradasyonun değişmesiyle bitümlü karışımın performans özelliklerinin de değişim göstereceği açıktır. Bu hususta yapılmış çalışmalar incelendiğinde; esnek üstyapılarda önemli bir bozulma türü olan tekerlek izi oluşumuna karşı direncin agrega gradasyonuna bağlı olarak farklılaşabileceği görülmüştür. Laboratuvar testlerine göre, Superpave agrega gradasyonunda kısıtlı bölgenin üstünde kalan gradasyon ile daha yüksek tekerlek izi direnci elde edilebileceği ifade edilirken prototip ölçekli hızlandırılmış kaplama testlerinde bu sonucun elde edilemediği belirtilmiştir [1]. Diğer bir çalışmada, şartname limitlerindeki üst sınıra daha yakın agrega gradasyonuna sahip bitümlü karışımların tekerlek izine karşı daha dirençli oldukları ve bu durumun daha yüksek yoğunluğa sahip olmalarından ileri geldiği yorumlanmıştır [2]. Ancak; Superpave agrega gradasyonunun temel alındığı çalışmada, kaba ve ince gradasyonlu agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlar arasında tekerlek izi direnci bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir farklılaşmanın oluşmadığı belirtilmiştir [3] ve kaba gradasyona sahip karışımların tekerlek izi direnci bakımından agrega özelliklerine daha duyarlı oldukları ifade edilmiştir [4].

Bitümlü karışımlardaki agregalar için tanımlanmış farklı gradasyon türleri mevcuttur ve bunlar önemli performans farklarına sebep olabilmektedirler. Açık gradasyona sahip agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlarda yoğun gradasyona kıyasla daha fazla boşluk ve daha düşük stabilite elde edildiği belirlenmiştir [5]. Gradasyon aralığındaki ortalama, alt limit ve üst limit değerlerin kullanıldığı çalışmada, en yüksek stabilite değerleri alt limit gradasyonla elde edilmiştir. Bununla birlikte; suyla koşullandırma sonrasındaki stabilite kaybı incelendiğinde, üst limit gradasyona sahip agrega içeren bitümlü karışımların suyun zararlı etkilerine karşı daha dayanıklı oldukları görülmüştür [6]. Diğer bir çalışmada ise, sudan en fazla zarar gören bitümlü karışımın üst gradasyona (daha ince) sahip agrega grubu ile hazırlanmış olması dikkat çekicidir [7]. Ancak; farklı bir çalışmada, suya maruz kalan üst limit agrega gradasyonuna sahip bitümlü karışımların hem stabilite hem de çekme dayanımı bakımından diğer agrega gradasyonlarına (ortalama ve alt limit) kıyasla daha iyi sonuçlar sağladığı ve bu suretle daha ince agrega gradasyonu ile su

etkilerine karşı daha fazla direnç elde edilebileceği belirtilmiştir [8]. Gradasyonun stabilite üzerindeki etkisi ile ilgili literatür çalışmaları farklılıklar içermektedir. En yüksek stabilitenin ortalama gradasyon ile elde edildiği belirtilirken [9] agrega dane boyutunun küçülmesi ile (gradasyon aralığında üst tarafa doğru ilerledikçe) stabilitenin arttığı da görülmektedir [10-12]. Agregada gradasyonunda incelenen agregalar arasındaki boşluk yüzdesini (VMA) ve akmayı arttırdığı çalışmada, en yüksek stabilite değeri ortalama gradasyon ile edilmiştir. Ancak, aynı çalışma tarafından bitümlü karışımlar için en iyi sonuçların ortalama gradasyon ile elde edilmediği de belirtilmiştir [13]. Agregada türü olarak kireçtaşı, dolomit ve bazaltın, agrega gradasyonu olarak ince, orta ve kaba gradasyonların kullanıldığı çalışmada üst (ince) gradasyona sahip dolomit ve bazalt ile hazırlanan karışımlarda daha yüksek stabilite elde edilmiştir. Kireçtaşında ise yüksek stabilite alt (kaba) gradasyon ile sağlanmıştır [14]. Daha ince agrega gradasyonu ile daha iyi yorulma performansı elde edilebilmektedir [15]. Sıkışmış karışımda agregalar arası boşluk yüzdesinin ve akmanın agrega gradasyonu inceldikçe arttığı görülmüştür [9, 16]. Bu çalışmalarda bitümlü dolu boşluk oranı (Vf) bakımından farklı sonuçlar elde edilmiştir. Gradasyonun incelenmesiyle Vf'nin arttığı belirtilirken [16] diğer çalışmada [9] bunu desteklemeyen sonuçlar görülmüştür. Literatürde agrega gradasyonu ile VMA arasında daha önce belirtilen ilişkinin aksine gradasyonun incelenmesiyle VMA'da azalma meydana geldiği belirtilmiştir [17]. Bununla birlikte; agreganın nominal maksimum boyutunda azalmanın, karışımın VMA'sını arttırdığı, Vf'sini ise azalttığı da raporlanmıştır [18]. Kireçtaşı ve bazalt ile ayrı ayrı yapılan çalışmada, agrega gradasyonunun incelenmesiyle bitümlü karışımın birim ağırlığı (Dp) azalmış, boşluk oranı (Vh) ise artmıştır. Ancak, dolomit kullanıldığı aynı çalışmada Dp ve Vh için aynı değişimlerin elde edilmediği görülmüştür [14]. Bununla birlikte, agrega gradasyonundaki incelenen bitümlü karışımdaki boşlukları azaltabildiği belirtilmiştir [19]. Farklı bir çalışmada ise; en yüksek Dp ve en düşük Vh değerleri ortalama gradasyon ile elde edilirken gradasyonun incelenmesi (üst limit) veya kabalaşması (alt limit) Dp değerinde azalmalar, Vh değerinde ise artışlar meydana getirmiştir [10]. Agregada gradasyonundaki incelenmeyle Dp değerlerinde artış meydana geldiği de görülmüştür [18].

Bu çalışmada, bitümlü karışımların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde agreganın sahip olduğu gradasyon etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 2013 yılı Karayolu Teknik

Şartnamesinde binder tabakası için belirtilen gradasyon sınırları esas alınarak ortalama, alt limit, üst limit değerleri ile birlikte alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen beş farklı agrega gradasyonu belirlenmiştir. % 7'lik limit dışı gradasyonlar, çalışma esnasında oluşabilecek gradasyon hatalarının bitümlü karışımda yol açabileceği performans değişimlerinin öngörülebilmesi amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir. Her bir gradasyon ile Marshall tasarımı yapılmıştır. Bitümlü karışımlardaki agrega gradasyonunun etkisi; stabilite, akma, Dp, Vh, Vf, VMA ve Marshall oranı sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme (Material)

Marshall tasarımlarında 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Marshall briketlerinde kireçtaşı kullanılmıştır. Kireçtaşına ait özgül ağırlık değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

2.2. Metot (Method)

Farklı agrega gradasyonlarının bitümlü karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla Marshall tasarım yöntemi [20] uygulanmıştır. Marshall tasarımlarında Şekil 1'de görülen beş farklı agrega gradasyonu kullanılmıştır.

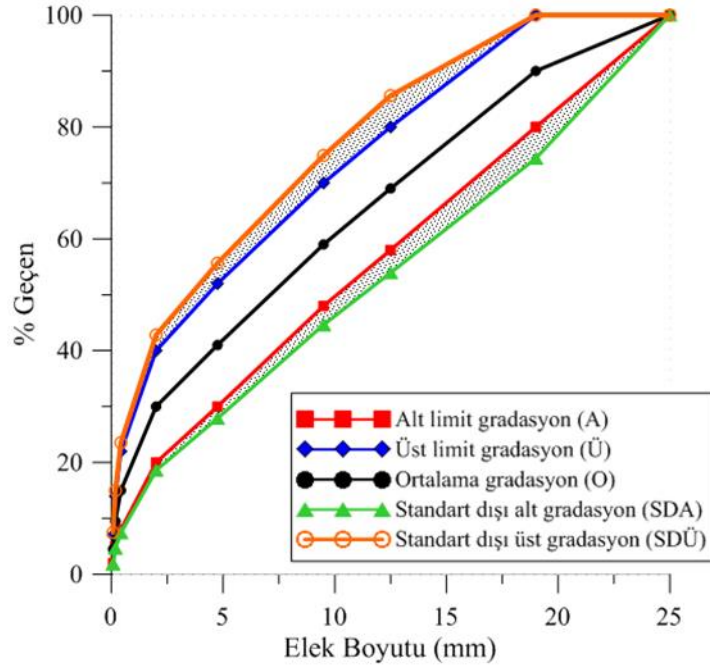
Gradasyonlarda, Karayolu Teknik Şartnamesinde (2013) binder tabakası için verilen agrega gradasyon aralığı temel alınmıştır. Gradasyon aralığının ortalama (O), alt limit (A), üst limit (Ü) değerleri ile birlikte, alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen standart dışı alt (SDA) gradasyon, ve standart dışı üst (SDÜ) gradasyon Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'in orta kısmında görülen taralı olmayan alan binder tabakası için şartnamede tanımlanan gradasyon aralığını (sınırlarını) göstermektedir. Alt ve üst kısımlarda bulunan taralı alanlar ise şartname limitlerinin çalışma dahilinde ne kadar aşıldığını ifade etmektedir. Çalışmada limit dışı gradasyon kullanılmasıyla gradasyon aralığına uyulamaması durumunda bitümlü karışım özelliklerinin ne yönde değişim gösterdiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Marshall briketleri, Şekil 1'de verilen agrega gradasyonları kullanılarak Çizelge 3'te belirtilen koşullarda üretilmiştir. Üretilen briketler oda koşullarında bir gün bekletildikten sonra Marshall testine tabii tutulmuşlardır. Test öncesinde her bir brikete ait havada, suda ve doygun yüzey kuru ağırlık ölçümleri yapılmıştır. 60°C'deki su banyosunda 30 dakika bekletilen briketlerin stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Ölçümler ve hesaplamalar neticesinde elde edilen değerlerle farklı bitüm içeriklerindeki Dp, Vh, Vf, VMA, Stabilite, akma ve Marshall oranı grafikleri hazırlanmıştır. Hazırlanan grafikler incelenerek agrega gradasyonunun bitümlü karışımların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. 50/70 penetrasyon dereceli bitümün özellikleri (Properties of the 50/70 penetration grade bitumen)

Özellik	Değer	Standart
Penetrasyon (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	55,3	ASTM D5
Yumuşama noktası, °C	51,8	ASTM D36
Parlama noktası, °C	283	BS EN 22592
Özgül ağırlık, 25°C	1,01	ASTM D70
Viskozite (135°C), Pa.s	0,295	ASTM D4402
Viskozite (150°C), Pa.s	0,184	ASTM D4402

Çizelge 2. Kireçtaşına ait özgül ağırlık değerleri (Specific gravity values of limestone)

Agrega grubu	Hacim özgül ağırlık	Zahiri özgül ağırlık
Kaba agrega	2,759	2,781
İnce agrega	2,727	2,76
Filler	-	2,764



Şekil 1. Marshall tasarımlarında kullanılan agrega gradasyonları (Aggregate gradations used in Marshall Designs)

Çizelge 3. Marshall briketleri üretim koşulları (Marshall briquettes fabrication parameters)

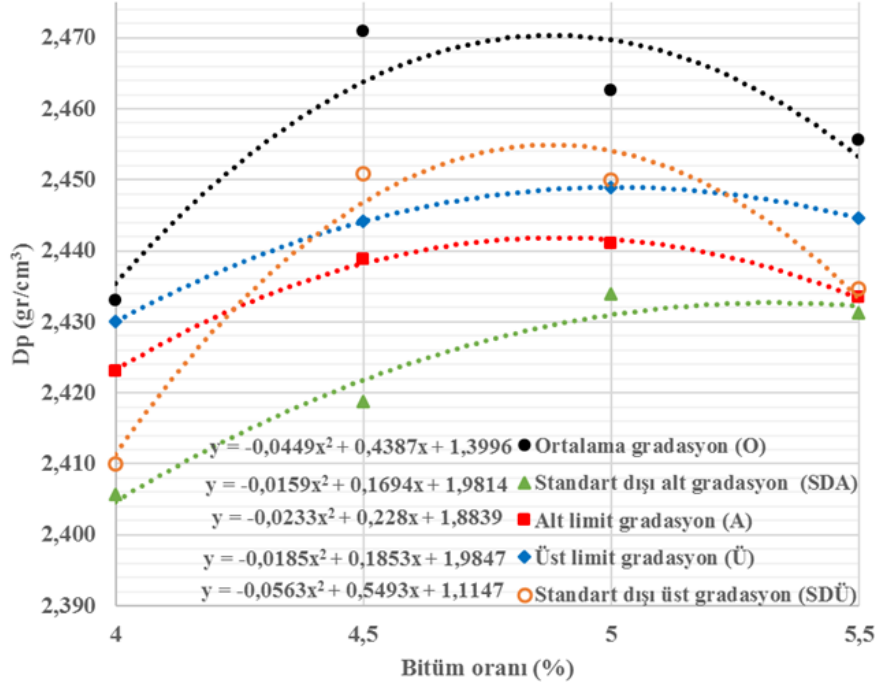
Parametre	Uygulamada kullanılan değer
Her bir brikette bulunan agrega miktarı	1150 gr
Tasarımda kullanılan bitüm içerikleri	4; 4,5; 5; 5,5 (agrega ağırlığının %'si olarak)
Her bir bitüm içeriği için üretilen briket sayısı	3
Agrega-bitüm karıştırma sıcaklığı	150±5°C
Agrega-bitüm karıştırma süresi	2-3 dakika
Sıkıştırma koşulları	Her bir yüze 75 Marshall tokmak darbesi

3. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS AND DISCUSSION)

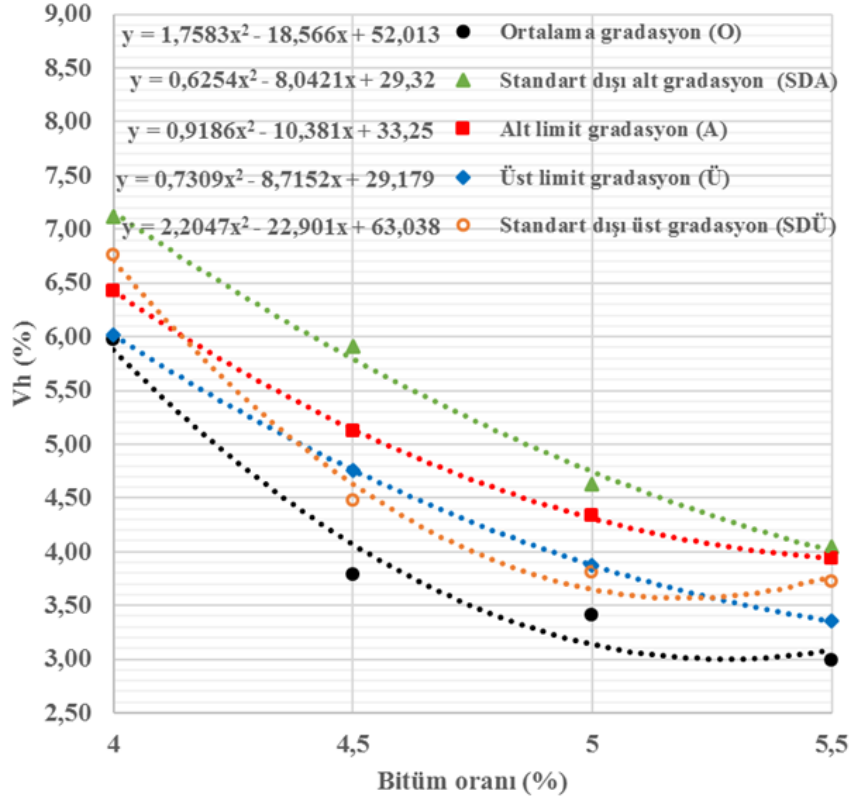
3.1. Agrega Gradasyonunun Birim Ağırlık (Dp) ve Boşluk Oranı (Vh) Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Unit Weight (Dp) and Air Void Ratio (Vh))

Agrega gradasyonunun Dp ve Vh üzerinde meydana getirdiği değişimler ve ilgili yaklaşım (regresyon) fonksiyonları Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere tüm tasarımlardaki Dp yaklaşım grafiklerinde birer tepe noktası oluşmuştur. En yüksek Dp değerleri ortalama gradasyona, en düşük değerler ise SDA gradasyona sahip agrega grubu ile elde edilmiştir. Agrega dane boyutunun artması veya azalması ortalama gradasyona kıyasla Dp sonuçlarını azaltıcı yönde etkilemiştir. Agrega grubundaki dane boyutu büyüdükçe bitümlü karışımı sıkıştırmak zorlaşır. Bu

yüzden, diğer gradasyonlara göre ince malzemenin daha az olduğu alt limit ve SDA gradasyonlara sahip agrega ile imal edilen bitümlü karışımların sıkışmaya karşı gösterdiği direnç daha yüksektir. Tüm briketler aynı sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırıldığından daha fazla kaba agrega içeren briketlerde oluşan boşluk oranı daha fazla olacaktır. Boşluk oranının daha yüksek olması Dp değerinin daha düşük olmasıyla sonuçlanacaktır. Test sonuçlarında da bu durum gözlenmiş olup en düşük Dp değerleri SDA gradasyona sahip briketlerde gözlenmiştir. Diğer taraftan, ince malzemenin artması bitümlü karışımın daha kolay sıkıştırılmasına imkan verir. Ancak, ince daneler arasındaki çok sayıda küçük boşluklar sebebiyle, toplamda meydana gelen daha yüksek boşluk oranına bağlı olarak briketlerde daha düşük Dp değerleri oluşacaktır.



Şekil 2. Agrega gradasyonunun Dp üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Dp)



Şekil 3. Agrega gradasyonunun Vh üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Vh)

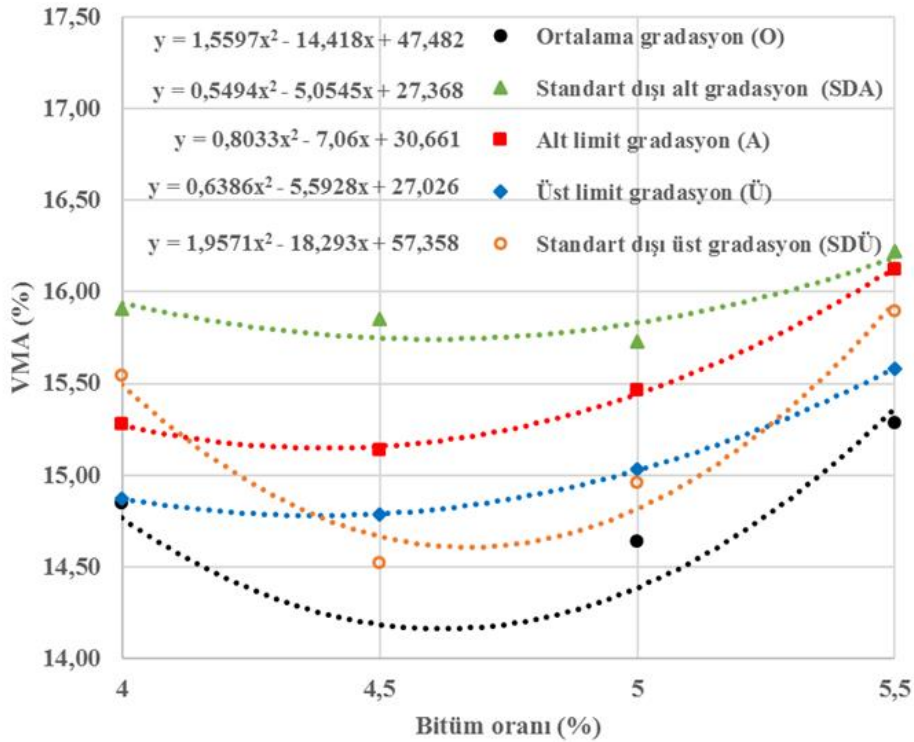
Şekil 3'te görüldüğü üzere bitümlü karışımlardaki boşluk oranı agrega gradasyonunun ortalama değerden farklılaşmasıyla artış göstermiştir. En yüksek boşluk oranları, en düşük Dp değerlerine sahip olan SDA gradasyon ile elde edilmiştir. En düşük boşluk değerleri ise ortalama gradasyon ile sağlanmıştır. Tüm farklı agrega gradasyonları için, bitüm oranının artması ile briketlerde oluşan boşluk miktarlarında beklendiği üzere azalmalar görülmüştür. Şekil 2 ve 3 birlikte incelendiğinde; % 4,5 ve % 5 bitüm oranları için agrega gradasyonunun ortalama değerlerden aşağı yönde ayrılma göstermesi (A ve SDA gradasyonları) yukarı yönde ayrılma göstermesine kıyasla (Ü ve SDÜ gradasyonları) Dp ve Vh değerlerinde daha fazla değişim meydana getirmiştir. Bu suretle, gradasyondaki kabalaşmanın Dp ve Vh üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir. Agrega gradasyonunun Dp ve Vh üzerindeki etkilerinin incelendiği literatür çalışmalarında da benzer sonuçlarla karşılaşılabilmektedir. Bitümlü karışımlara ait mekanik özellikler üzerinde gradasyonun etkilerinin incelendiği çalışmada; ortalama gradasyona kıyasla gradasyonun hem incilmesi hem de kabalaşmasıyla (gradasyonun ortalama değerden uzaklaşmasıyla) Dp'nin azaldığı, Vh'nin arttığı tespit edilmiştir [10]. Benzer şekilde; bitümlü karışımda kullanılan kaba agrega daha da kabalaştıkça [21] veya kaba agrega oransal olarak fazlalaştıkça [17] Vh değerleri artış göstermiştir.

3.2. Agrega Gradasyonunun Agregalar Arasındaki Boşluk Oranı (VMA) ve Bitümle Dolu Boşluk Oranı (Vf) Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Voids in Mineral Aggregate Ratio (VMA) and Voids Filled With Bitumen Ratio (Vf))

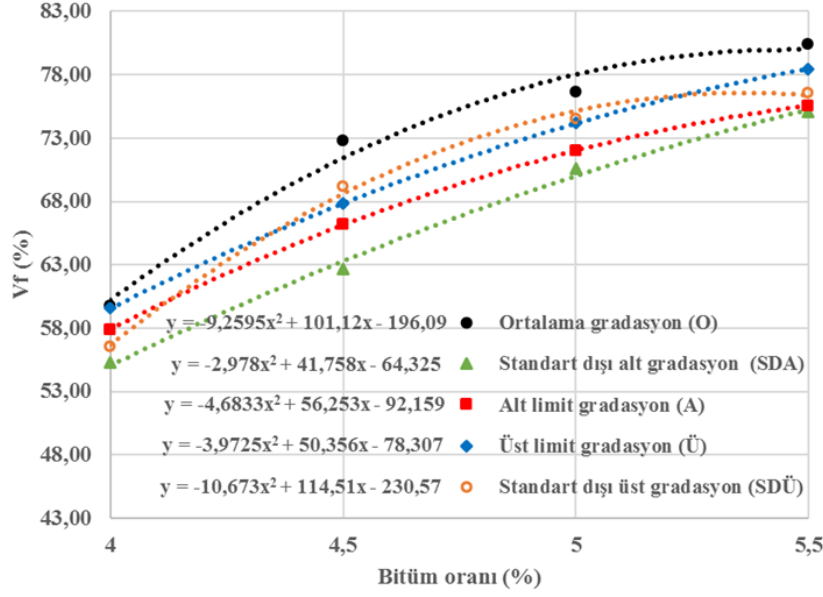
Bitümlü karışımların VMA ve Vf değerlerinin agrega gradasyonuna bağlı olarak gösterdikleri değişimler Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.

VMA, sıkıştırılmış bitümlü karışımda agregalar arasındaki boşluk yüzdesi olarak tanımlanır. 2013 Karayolu Teknik Şartnamesine göre binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışıma ait VMA'nın % 13-15 arasında olması istenir [22]. Bitümün, agregalar arasında belirli bir film kalınlığı oluşturabilmesi için VMA'nın minimum değerden daha az olmaması gerekir. Aksi halde, agrega danelerinin yüzeylerinde oluşacak bitüm filmindeki incelik sebebiyle bitümlü karışımın durabilitesi düşük olacaktır.

Şekil 4'te görüldüğü üzere en düşük VMA değerleri ortalama gradasyon ile elde edilmiştir. Agrega gradasyonu ile VMA ilişkisinin incelendiği bazı literatür çalışmalarında da en düşük VMA ortalama gradasyon ile elde edilmiştir [10, 14, 17]. Test sonuçları kapsamında yapılan hesaplamalara göre gradasyonun hem incilmesi hem de kabalaşması VMA'nın artmasına sebep olmuştur.



Şekil 4. Agrega gradasyonunun VMA üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on VMA)



Şekil 5. Agrega gradasyonunun Vf üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Vf)

Özellikle alt limit ve SDA gradasyonlarına ait grafikler incelendiğinde, VMA değerlerinin tüm farklı bitüm içeriklerinde şartname üst sınırı olan % 15'ten fazla olduğu görülür. Bununla beraber; alt limit ve SDA gradasyonlarına ait VMA grafikleri, gradasyonun daha kaba hale gelmesinin VMA'yı daha da arttırabileceğini düşündürmektedir. Üst limit ve SDÜ gradasyonlarının ise % 4,5-5 bitüm oranı aralığında ve civarında üst sınıra yakın olmakla beraber VMA ile ilgili şartı sağlayabileceği görülmektedir.

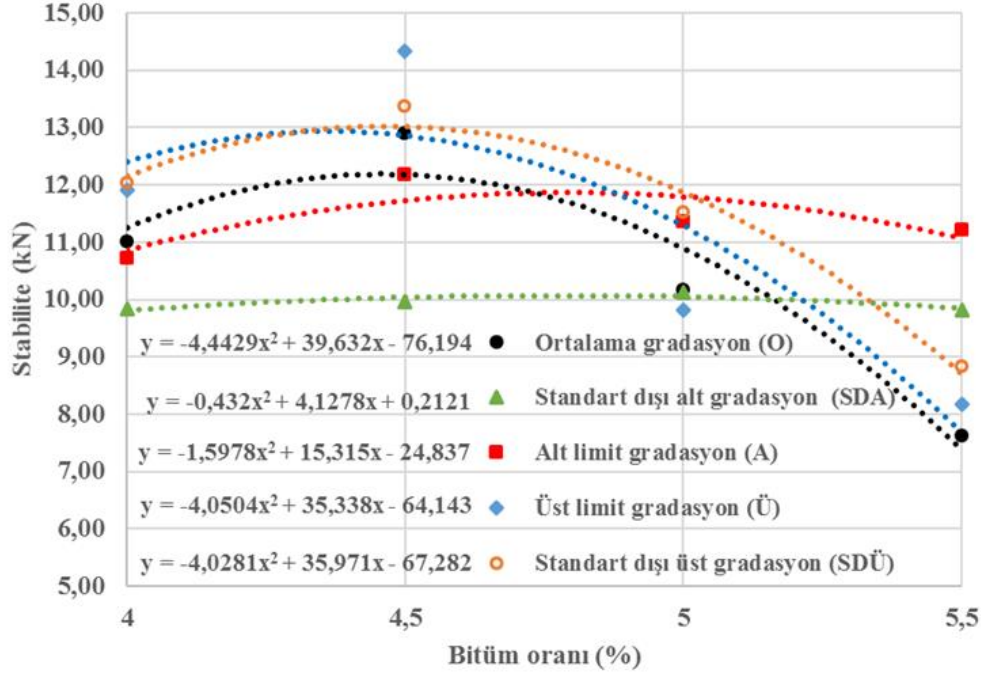
Vf, VMA'nın ne kadarının bitüm ile dolu olduğunu ifade eder ve şartnameye göre [22] % 60-75 arasında olması gerekir. Şekil 5'te görüldüğü üzere en yüksek Vf değerleri ortalama gradasyon ile elde edilmiştir. Diğer gradasyonlar (A, SDA, Ü, SDÜ) kullanıldığında ise Vf değerinde azalmalar meydana gelmiştir. Agrega gradasyonunun Vf üzerinde farklı değişimler oluşturduğunu [21], en düşük Vf'nin kaba gradasyonla [16, 23, 24] veya ortalama gradasyonla [9, 25] elde edildiğini belirten çalışmalar mevcuttur. Bitümlü karışımda ortalama gradasyona kıyasla daha büyük dane boyutuna sahip agrega kullanılması (A ve SDA) Vf üzerinde azalma yönünde daha fazla değişim meydana getirmiştir. Benzer durum daha önce bahsedilen Dp, Vh ve VMA değişkenleri için de geçerlidir. A ve SDA gradasyonları, Ü ve SDÜ gradasyonlarına kıyasla Marshall değişkenleri üzerinde daha etkili değişimler meydana getirmişlerdir. Test sonuçlarına göre tüm agrega gradasyonları için % 4,5 ve civarındaki bitüm oranının, binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışım için tanımlanan Vf sınır şartlarını sağlayacağı tespit edilmiştir.

3.3. Agrega Gradasyonunun Stabilite ve Akma Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Stability and Flow)

Stabilite değeri, Marshall parametreleri arasında araştırmacıların özellikle incelediği ve yorumladığı bir değişkendir. Daha yüksek Marshall stabilitesine sahip bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı dirençleri daha yüksek olacaktır. Bu suretle, kaplamada bölgesel çökme, ondülasyon ve tekerlek izi oluşumları gibi deformasyon türü bozulmalar daha az oluşacaktır [26, 27]. Malzeme kalitesi ve üretim koşullarının yanında, agrega gradasyonu ve karışımda kullanılan bitüm oranı Marshall stabilitesinde etkilidir. Şekil 6'da agrega gradasyonunun stabilite üzerinde oluşturduğu değişimler sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere bitüm oranındaki değişimlerin stabilite üzerindeki etkileri alt limit ve SDA gradasyonlarında oldukça düşük seviyededir. Her iki gradasyon için stabilite yaklaşım grafikleri küçük değişimler içerse de oldukça yatay seyredirler. Ancak, yaklaşım fonksiyonları incelendiğinde (Şekil 6) stabilite grafiklerinde beklenen tepe noktalarının oluştuğu anlaşılmaktadır. En yüksek stabilite % 4,5 bitüm oranında üst limit gradasyonda elde edilmiştir. Fakat aynı gradasyon için % 5 bitüm oranında elde edilen en düşük stabilite değeri, üst limit gradasyonun bitüm içeriğine karşı hassas olduğunu göstermektedir. Ortalama gradasyona kıyasla, üst limit ve SDÜ agrega gradasyonları ile daha yüksek stabilite elde edilmiştir. Literatürde de ortalama gradasyona göre daha ince gradasyona sahip agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlarda daha yüksek stabilite elde edilebildiği raporlanmıştır [11, 28, 29].

Bunun yanında, en yüksek stabilite değerlerinin ortalama gradasyon ile meydana geldiğini belirten çalışmalar da mevcuttur [9, 16]. Binder tabakası için şartnamede [22] tanımlanan en düşük stabilite olan 7,36 kN'luk (750 kg) büyüklüğün farklı agrega gradasyonları ve bitüm içeriklerinin hepsinde sağlandığı Şekil 6'dan anlaşılabilir.

A ve SDA gradasyonları için % 4 ve % 4,5 bitüm oranlarındaki stabilite düşüklüğü, bitüm oranı daha fazla olduğunda ortadan kalkmaktadır. Ü ve SDÜ gradasyonlarında ise ortalama gradasyona kıyasla genel olarak daha yüksek stabilite elde edilmiştir.



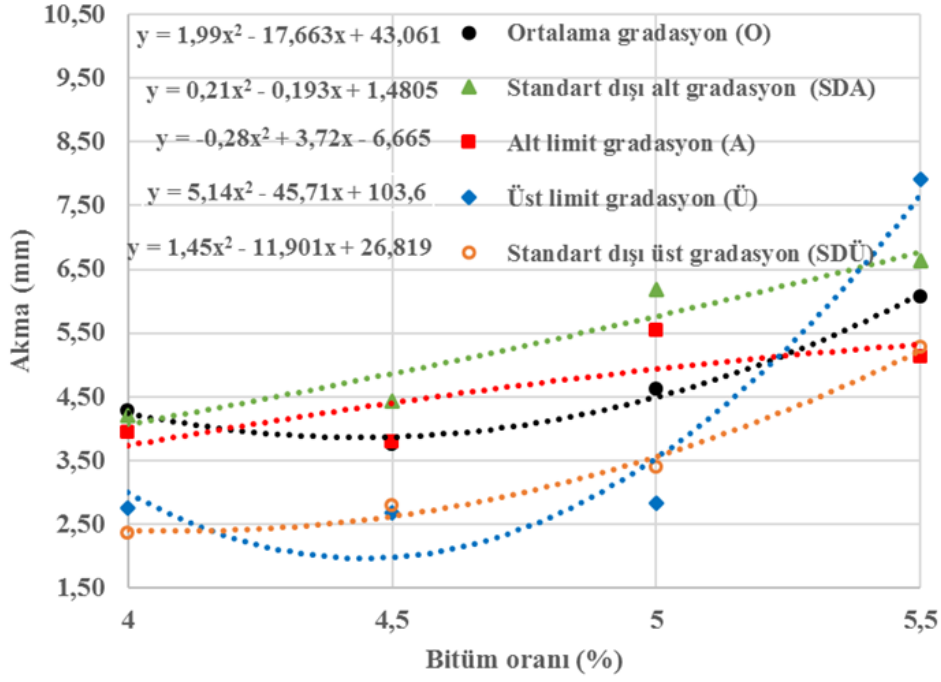
Şekil 6. Agrega gradasyonunun stabilite üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on stability)

Çizelge 4. Optimum bitüm oranları (Optimum bitumen ratios)

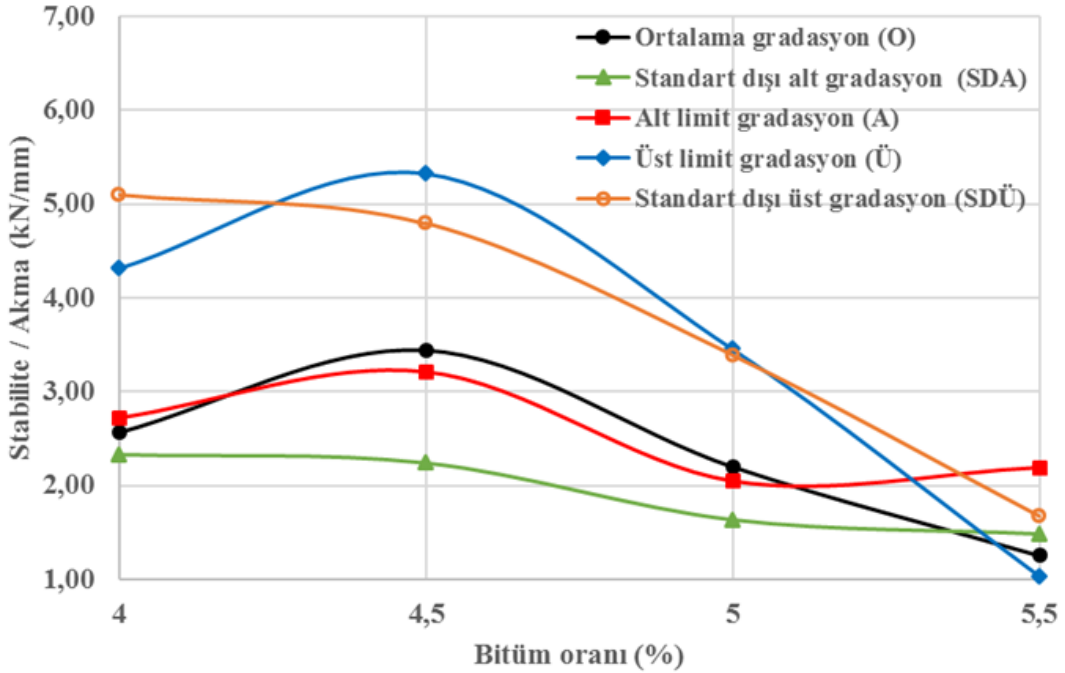
Gradasyon türü	Dp	Stabilite	Vh	Vf	Optimum bitüm oranı (%)
O	4,89	4,46	4,21	4,3	4,47
SDA	5,33	4,78	4,86	4,8	4,94
A	4,89	4,79	4,57	4,6	4,71
Ü	5,01	4,36	4,39	4,48	4,56
SDÜ	4,88	4,47	4,39	4,44	4,55

Çizelge 5. Optimum bitüm oranlarına karşılık gelen VMA ve akma değerleri (VMA and flow values corresponding to the optimum bitumen ratios)

Gradasyon türü	Optimum bitüm oranı (%)	Optimum bitüm oranındaki VMA (%)	Optimum bitüm oranındaki akma (mm)	Optimum bitüm oranı için uygunluk kontrolü
O	4,47	14,2	3,87	Uygun
SDA	4,94	15,81	5,65	Uygun değil
A	4,71	15,23	4,64	Uygun değil
Ü	4,56	14,8	2,04	Uygun
SDÜ	4,55	14,64	2,69	Uygun



Şekil 7. Agrega gradasyonunun akma üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on flow)



Şekil 8. Marshall oranları (Marshall quotients)

Farklı agrega gradasyonları için optimum bitüm oranları; maksimum D_p , maksimum stabilite, şartname ortalama V_h ve şartname ortalama V_f değerlerine göre Şekil 2-3-5-6'da verilen yaklaşım fonksiyonları kullanılarak Çizelge 4'te gösterildiği gibi dört değerin ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4'te hesaplanan optimum bitüm oranlarının uygun olup olmadıkları Şekil 4 ve 7'de verilen VMA ve akma grafiklerine ait yaklaşım fonksiyonları ile kontrol edilmiştir. Her bir optimum bitüm oranının uygun olabilmesi için şartnamede VMA ve akma için verilen limitleri

sağlaması gerekir. Optimum bitüm oranlarına karşılık gelen VMA ve akma değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışımın VMA değeri % 13-15 arasında, akma değeri 2-4 mm arasında olması gerekir. Çizelge 5'te görüldüğü üzere O, Ü ve SÜ gradasyonlarda her iki şart sağlandığından hesaplanan optimum bitüm oranının kullanılması uygundur. A ve SDA gradasyonlarında ise optimum bitüm oranında hem VMA hem de akma değerleri şartname sınır değerlerinin üzerindedir.

Agrega gradasyonunun bitümlü karışımların Marshall oranları üzerindeki etkisi Şekil 8'de sunulmuştur.

Bitümlü karışımlarda kalıcı deformasyonlara karşı direncin yüksek olması için stabilitenin yüksek, akmanın düşük olması tercih edilir. Bu iki değişkenin birbirine oranlanmasıyla elde edilen Marshall oranı (Stabilite/akma) bu amaç için kullanılabilir [30-33]. Farklı agrega gradasyonları ile yapılan tasarımlarda elde edilen Marshall oranları Şekil 8'de görülmektedir. Buna göre, ortalama gradasyona kıyasla daha küçük dane boyutuna sahip agrega ile (Ü ve SDÜ gradasyonları) Marshall oranında önemli artışlar elde edilmiştir. Ü ve SDÜ gradasyonları ile bitümlü karışımın rijit davranış özelliği artarak deformasyonlara karşı direnci yükselmiştir.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, karayolu esnek üstyapısının binder tabakasında kullanılan bitümlü karışımlardaki agrega gradasyonunun karışıma ait fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. 2013 Karayolu Teknik Şartnamesinde binder tabakasında kullanılacak agrega için tanımlanmış olan gradasyon aralığının ortalama, alt ve üst değerlerinin yanı sıra aralığın dışında bulunan iki gradasyonla birlikte olmak üzere toplamda beş farklı agrega gradasyonu ile yapılan Marshall tasarımları sonunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Agregada dane boyutunun ortalama gradasyona kıyasla artması veya azalması (Ü, SDÜ, A ve SDA gradasyonları) briketlerin Dp ve Vf değerlerini azaltmış, VMA ve Vh değerlerini arttırmıştır. Bu değişimlerde gradasyondaki kabalaşmanın (A ve SDA) daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Ü ve SDÜ ile ortalama gradasyona kıyasla genel olarak daha yüksek stabilite elde edilmiştir. A

ve SDA gradasyonlarında ise % 4 ve % 4,5 bitüm oranlarındaki stabilite düşüklüğü, bitüm oranı fazlalığında ortadan kalkmıştır.

- Stabilite ve akmanın birlikte değerlendirildiği Marshall oranı bakımından ortalama gradasyona kıyasla Ü ve SDÜ ile daha yüksek değerler elde edilmiştir. A ve SDA gradasyonlarında ise farklı sonuçlar oluşmuştur. Özellikle SDA gradasyonu ile Marshall oranı azalmıştır.
- O, Ü ve SDÜ'de bitümlü karışım için gereken mekanik özellikler her bir gradasyon için belirlenen optimum bitüm içeriğinde sağlanmaktadır. A ve SDA gradasyonlarında optimum bitüm oranlarındaki VMA ve akma değerleri şartname sınır değerlerine yakın olmakla beraber istenen şartları sağlamamıştır.

Yukarıda özetlenen sonuçlar ışığında; binder tabakasında kullanılacak agrega için belirlenen gradasyon aralığında ortalama değerlerden yukarı yönde ayrılmanın stabilite bakımından artış sağlama potansiyelinin olduğu, ortalama değerlerden aşağı yönde ayrılmanın ise bitümlü karışımlarda akma, VMA ve stabilite bakımından olumsuzluklar meydana getirebileceği söylenebilir.

5. SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

A	Alt limit gradasyon
Dp	Birim ağırlık
O	Ortalama gradasyon
SDA	Standart dışı alt gradasyon
SDÜ	Standart dışı üst gradasyon
Ü	Üst limit gradasyon
Vf	Bitümle dolu boşluk oranı
Vh	Hava boşluğu oranı
VMA	Agregalar arası boşluk oranı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, laboratuvar imkanları için Konya Teknik Üniversitesi'ne teşekkür eder.

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 declare that the materials and methods used in their study do not require ethics committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Her iki yazar deneylerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazılmasında beraber çalışmıştır.

Both authors worked together to conduct the experiments, analyze the results and write the paper.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.




There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hand A.J., Stiadly J.L., White T.D., Noureldin A.S., Galal K., Gradation effects on hot-mix asphalt performance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1767 (1), 152-157, (2001).
- [2] Naji A., Abed A.H., Effect of aggregate gradation and filler content on the rutting resistance of modified colored hot mix asphalt, *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 24 (2), 137-143, (2021).
- [3] Kandhal P.S., Cooley L.A., Coarse-versus fine-graded superpave mixtures: comparative evaluation of resistance to rutting, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1789 (1), 216-224, (2002).
- [4] Zhang J., Cooley L.A., Hurley G., Parker F., Effect of Superpave Defined Restricted Zone on Hot-Mix Asphalt Performance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1891 (1), 103-111, (2004).
- [5] Kalaitzaki E., Kollaros G., Athanasopoulou A., Influence of aggregate gradation on hma mixes stability, *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 4, 13-22, (2015).
- [6] Aodah H.H., Kareem Y.N.A., Chandra S., Effect of aggregate gradation on moisture susceptibility and creep in hma, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 72, 56-61, (2012).
- [7] Sangsefidi E., Ziari H., Mansourkhaki A., The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (2), 133-141, (2014).
- [8] Habeeb H., Chandra S., Nashaat Y., Estimation of Moisture Damage and Permanent Deformation in Asphalt Mixture from Aggregate Gradation, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (6), 1655-1663, (2014).
- [9] Banerji A.K., Das A., Mondal A., Biswas R., Obaidullah M., Influence of Variation in the Aggregate Gradation Range on Mix Design Properties of Bituminous Concrete (BC) Mixes used as Wearing Course, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3 (9), 1258-1262, (2014).
- [10] Golalipour A., Jamshidi E., Niazi Y., Afsharikia Z., Khadem M., Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449, (2012).
- [11] Maharjan R., Tamrakar G.B.S, Effect of Aggregate Gradation Variation on the Marshall Mix Properties of Asphalt Concrete, *Proceedings of IOE Graduate Conference, Nepal* 213-219, (2017).
- [12] Khairandish M.I., Chopra A., Singh S., Chohan J.S., Kumar R., Effect of Gradation and Morphological Characteristics of Aggregates on Mechanical Properties of Bituminous Concrete and Dense Bituminous Macadam, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46: 293-307 (2022).
- [13] Sangsefidi E., Ziari H., Sangsefidi M., The Effect of Aggregate Gradation Limits Consideration on Performance Properties and Mixture Design Parameters of Hot Mix Asphalt, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (1), 385-392, (2016).
- [14] Afaf A.H.M., "Effect Of Aggregate Gradation And Type On Hot Asphalt Concrete Mix Properties", *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering*, 42 (3), 567-574, (2014).
- [15] Sousa J.B., Pais J.C., Prates M., Barros Rui, Langlois P., Leclerc A., Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes, *Transportation Research Record*, 1630 (1), 62-68, (1998).
- [16] Sangsefidi E., Ziari H., Sangsefidi M., The Effect of Aggregate Gradation Limits Consideration on Performance Properties and Mixture Design Parameters of Hot Mix Asphalt, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (1), 385-392, (2016)
- [17] Cao W., Liu S., Li Y., Xue Z., Effect of Aggregate Gradation on Volumetric Parameters and the High Temperature Performance of Asphalt Mixtures, *Fourth Geo-China International Conference, Shandong, China*, 42-50, (2016).

- [18] Tayh S.A., Alghrery H.S.J., Evaluation of The Effect of Gradation on Mechanical properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Baghdad, Iraq, 1105, 012087, (2021).
- [19] Husain N.M., Karim M.R., Mahmud H.B., Koting S., Effects of Aggregate Gradation on the Physical Properties of Semiflexible Pavement, Advances in Materials Science and Engineering, 529305, (2014).
- [20] TS EN 12697-34, Bitümlü karışımlar-Test yöntemleri-Bölüm 34: Marshall testi.
- [21] Liu S., Zhu L., Zhang H., Liu T., Ji P., Cao W., Effect of Gradation Variability on Volume Parameter and Key Performances of HMA, Frontiers in Materials, 7, 611409, (2021)
- [22] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, (2013).
- [23] Garcia V.M., Barros L., Garibay J., Abdallah I., Effect of Aggregate Gradation on Performance of Asphalt Concrete Mixtures”, Journal of Materials in Civil Engineering, 32 (5), 04020102, (2020).
- [24] Setiawan A., Suparma L.B., Mulyono A.T., Modelling Effect of Aggregate Gradation and Bitumen Content on Marshall Properties of Asphalt Concrete, International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 7 (2), 359-365, (2017).
- [25] Tessema G.T., Ponnurangam P., Investigation the Effect of Aggregates on Hot Mix Asphalt (HMA) Performance - A Case Study, International Journal of Engineering Research And Development, 15 (1), 31-40, (2019).
- [26] Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Farshbafian F.K., Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1409-1419, (2020).
- [27] Arslan D., Gürü M., Çubuk, M.K., Improvement of bitumen and bituminous mixtures performance properties with organic based zincphosphate compound, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (2), 459-466, (2012).
- [28] Elliott R.P., Ford M.C., Ghanim M., Tu Y.F., Effect of Aggregate Gradation Variation on Asphalt Concrete Mix Properties, Transportation Research Record, 1317, 52-60, (1991), <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1317/1317-006.pdf>
- [29] Ahmed M.A., Attia M.I.E., Impact of Aggregate Gradation and Type on Hot Mix Asphalt Rutting In Egypt, International Journal of Engineering Research and Applications, 3 (4), 2249-2258, (2013).
- [30] Morova N., Serin S., Terzi S., Saltan M., Küçükçapraz D.O., Karahançer S.S., Erişkin E., Utility of polyparaphenylene terephthalamide fiber in hot mix asphalt as a fiber, Construction and Building Materials, 107, 87-94, (2016).
- [31] Arslan D., Bayırtepe H., “Bitümlü sıcak karışımlara ait akma değerinin regresyon modelleri ile tahmini”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 6 (1), 45-53, (2018).
- [32] Karakas A.S., Sayın B., Kuloğlu N., The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period, Construction and Building Materials, 71, 406-415, (2014).
- [33] Haddadi S., Ghorbel E., Laradi N., Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA, Construction and Building Materials, 22, 1212-1219, (2008).

Performance Evaluation of Brushless Direct Current Motor Control Methods through Low-Cost Microcontroller-Based Real-Time Experiments

Emre YORAT^{1*}  Necdet Sinan ÖZBEK¹  Lütfü SARIBULUT¹ 

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 01250, Adana, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/01/2023
Revision: 24/03/2023
Accepted: 26/04/2023

Keywords

BLDC
Commutation Modes
DDS
L298N
Experimental Application

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/01/2023
Düzeltilme: 24/03/2023
Kabul: 26/04/2023

Anahtar Kelimeler

FDAM
Komütasyon Modları
DSS
L298N
Deneyisel Uygulama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study; 120°, 180°, 150° commutation methods, and direct digital synthesis (DDS) based sinusoidal pulse width modulation (SPWM) are applied to the brushless direct current (BLDC) motor and the performance comparison of BLDC commutation methods is evaluated by means of obtained waveforms, operable speed interval, current draw, and thrust. / Bu çalışmada; 120°, 180°, 150° komütasyon yöntemleri ve doğrudan sayısal sentezleme (DSS) tabanlı sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM), fırçasız doğru akım motoruna (FDAM) uygulanmış ve yöntemlerin performans karşılaştırması elde edilen dalga biçimleri, çalışma hız aralığı, çekilen akım ve itme kuvvetine göre gerçekleştirilmiştir.



Figure A: Schematic illustration of the study / Şekil A: Çalışmanın şematik gösterimi

Highlights (Önemli noktalar)

- Application of 120°, 180°, 150° commutation and DDS for BLDC/ 120°, 180°, 150° komütasyon ve DSS'nin FDAM için uygulaması
- Detailed explanation of applied methods/ Uygulanan yöntemlerin detaylı açıklaması
- Performance comparison of case results/ Durum sonuçlarının performans karşılaştırması

Aim (Amaç): The aim of this study is to examine the performance comparison of 120°, 180°, and 150° commutation methods, and DDS based SPWM by using low-cost experimental setup for BLDC motor. / Bu çalışmada 120°, 180° ve 150° komütasyon yöntemleri ile DSS tabanlı SDGM'nin düşük maliyetli bir deneysel düzenek kullanarak FDAM için performans karşılaştırması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): To the best of the authors' knowledge, the performance comparison of 120°, 180°, and 150° commutation methods, and DDS based SPWM is realized for the first time. In this context, it is also the first time that the performance of DDS algorithm is compared with mostly used commutation methods. / Yazarların bildiği kadarıyla, 120°, 180°, 150° komütasyon yöntemleri ile DSS tabanlı SDGM'nin performans karşılaştırması ilk kez gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ayrıca DSS algoritmasının performansı ilk kez başlıca kullanılan komütasyon yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

Results (Bulgular): The case studies have shown that DDS based sinusoidal commutation is convenient to be used in BLDC motor applications due to its lower power consumption and wider operable speed range. / Durum çalışmaları, daha düşük güç tüketimi ve daha geniş çalışma hız aralığı nedeniyle DSS tabanlı sinüzoidal komütasyonun FDAM uygulamalarında kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): In this study, the performance comparison of 120°, 180°, 150° modes, and DDS based SPWM was realized through case studies by observing waveforms, operable speed interval, current draw, and thrust. The study had shown that the DDS based SPWM had more best results than the other methods. / Bu çalışmada 120°, 180°, 150° modlarının ve DSS tabanlı SDGM'nin performans karşılaştırması, dalga biçimleri, çalışma hız aralığı, çekilen akım ve itme kuvveti gözlemlenerek durum çalışmaları yoluyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma, DSS tabanlı SDGM'nin diğer yöntemlere göre en iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir.



Performance Evaluation of Brushless Direct Current Motor Control Methods through Low-Cost Microcontroller-Based Real-Time Experiments

Emre YORAT^{1*} Necdet Sinan ÖZBEK¹ Lütfü SARIBULUT¹

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 01250, Adana, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/01/2023
Revision: 24/03/2023
Accepted: 26/04/2023

Keywords

BLDC
Commutation Modes
DDS
L298N
Experimental Application

Abstract

Brushless direct current (BLDC) motors are high efficiency synchronous motors that are employed in a variety of applications due to prominent features such as long operational life, low maintenance requirements, and great dynamic response. BLDC motors are driven by energizing the stator windings with an inverter circuit. To commutate the inverter switches, the trapezoidal (120°) method is generally used by considering the back electromagnetic force induced on unenergized phase of BLDC. Furthermore, depending on the application requirements, alternative commutation modes (CM) such as 180°, 150°, and sinusoidal-based approaches are utilized. In the literature, the performance comparison of some CMs was studied for two-phase on operation and three-phase on operation mode by considering the switching patterns. However, only a few research assessed the performance of two or three commutation modes simultaneously. In this study, the performance comparison of pulse width modulation (PWM) based commutation modes are examined by considering 120°, 180°, 150° modes, and sinusoidal PWM. In this scope, it is the first time that direct digital synthesis (DDS) is addressed as a BLDC control algorithm in a performance comparison study. In experimental studies, a simple and a low-cost drive circuit is designed to acquire the case results. According to the results, the proposed DDS-based sine commutation method is more efficient than other commutation methods and it has lower power consumption at both low and high speeds also a wider operable speed range than other applied methods.

Fırçasız Doğru Akım Motor Kontrol Yöntemlerinin Düşük Maliyetli Mikrodenetleyici Tabanlı Gerçek Zamanlı Deneyle Performans Değerlendirmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/01/2023
Düzeltilme: 24/03/2023
Kabul: 26/04/2023

Anahtar Kelimeler

FDAM
Komütasyon Modları
DSS
L298N
Deneysel Uygulama

Öz

Fırçasız doğru akım motorları (FDAM), uzun çalışma ömrü, düşük bakım gereksinimleri ve çok iyi dinamik yanıt gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılan yüksek verimli senkron motorlardır. FDAM bir inverter devresi ile stator sargılarına enerji verilerek sürülür. Evreç anahtarlarının komütasyonu için genellikle FDAM enerjisiz fazında indüklenen zıt elektromanyetik kuvvetine dayanan trapez (120°) yöntemi kullanılır. Ayrıca, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak 180°, 150° gibi alternatif komütasyon modları (KM) ve sinüzoidal tabanlı yaklaşımlar kullanılır. Literatürde, bazı KM'lerin performans karşılaştırması, iki fazlı çalışma ve üç fazlı çalışma modu için anahtarlar düzenleri dikkate alınarak incelenmiştir. Ancak, sadece birkaç araştırma aynı anda iki veya üç komütasyon modunun performansını değerlendirdi. Bu çalışmada, darbe genişlik modülasyonu (DGM) tabanlı komütasyon modlarının performans karşılaştırması 120°, 180°, 150° modları ve sinüzoidal DGM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, doğrudan sayısal sentez (DSS) ilk kez bir performans karşılaştırma çalışmasında bir BLDC kontrol algoritması olarak ele alınmaktadır. Deneysel çalışmalarda, basit ve düşük maliyetli bir sürücü devresi durum sonuçlarını elde etmek için tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen DSS tabanlı sinüs komütasyon yönteminin diğer komütasyon yöntemlerine göre daha verimli, hem düşük hem de yüksek hızlarda daha düşük güç tüketimine ve uygulanan diğer yöntemlere göre daha geniş çalışma hızı aralığına sahip olduğu görülmüştür.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Brushless direct current (BLDC) motors and permanent magnet synchronous motors are used in various application areas, such as drones, household appliances, aerospace, office automation, automotive applications, etc. They are preferred in many industries due to their high torque-to-weight ratio, efficiency, and lower maintenance requirements when compared to traditional direct current (DC) motors [1], [2]. Generally, there are two structurally distinct BLDC motors are employed [3]. The inrunner type BLDC motor is similar to the induction motor in that the rotor shaft is placed inside the stator windings while the rotor is placed outside of the stator windings at the outrunner types.

The rotor of BLDC motor is controlled by generating the rotational magnetic field at their stator, which is similar in principle to the three-phase induction motors. However, the field is produced by energizing the phase windings of the stator with a semi-conductor-based three-phase inverter circuit in the BLDC motor drive as shown in Figure 1. In the figure, R, L, and M represent phase stator resistance, self-inductance, and mutual inductance, respectively. Further, the induced back electromagnetic forces (back-EMF) on the stator windings are denoted by e_a , e_b , and e_c . Generally, MOSFETs, IGBTs, and power transistors are used as switching elements. Each switching element in the inverter circuit conducts current and changes its conduction state according to the commutation table. The ideal current conduction for the BLDC motor is given in Figure 2.

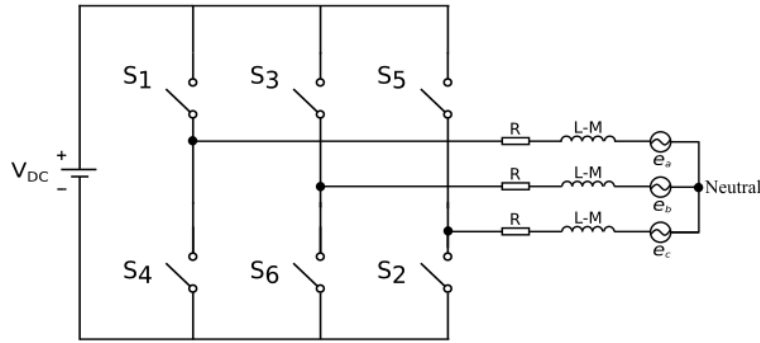


Figure 1. The power circuit of BLDC motor driver (FDAM sürücüsünün güç devresi)

There are widely used two methods for detecting the rotor position of BLDC motors which are known as sensed and sensorless-based methods. Sensed-based methods are usually established with hall sensors embedded into the stator [4]. These sensors provide the rotor position (even at a standstill) and

it is evaluated to perform the commutation action on the motor phases. However, their negative aspects such as reliability, sensitivity to temperature, and increasing power consumption of motors have led researchers to study sensorless-based methods [5].

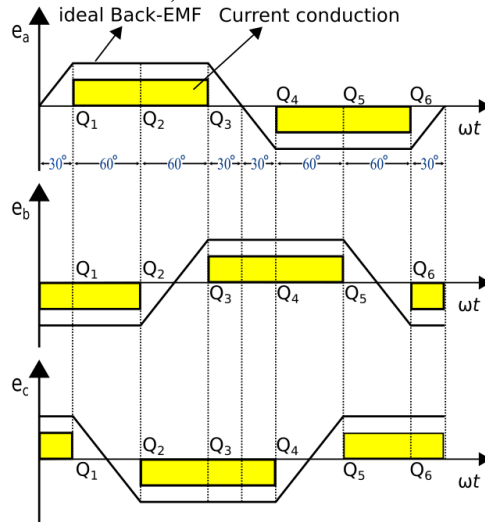


Figure 2. Back-EMF and commutation relation (Zıt elektromanyetik kuvvet ve komütasyon ilişkisi)

It is to be noted that sensorless-based methods often benefit from the back-EMF phenomena created in stator windings. This phenomenon generates a time-changing voltage on the unenergized phase. Back-EMF is proportional to motor speed and serves as an indication of rotor position. To identify the commutation states for a BLDC motor, rotor position information is required thus the back-EMF signal is used to determine the commutation states. In the literature, there are numerous back-EMF-based rotor position detection methods for BLDC motors. One of them relies on terminal voltage sensing. The terminal voltages are utilized to detect the back-EMF zero-crossing points on the unenergized phases, and then a 30° phase shift is performed to acquire the commutation states [6].

Another back-EMF method is based on the integration of back-EMF to find the commutation states. In this method, the commutation point is calculated by taking the integral of the unenergized phase from zero crossing to the predefined threshold value [7]. Apart from these techniques, the third harmonic of the back-EMF-based methods has been developed to find the commutation states. This method acquires the rotor position by using the voltage between the neutral point and the virtual neutral point. However, in many BLDC applications, the neutral point is not provided by the manufacturer so the voltage between the virtual neutral point and the midpoint of the dc-link is used to obtain the rotor position in the virtual third harmonic back-EMF method [8]. Also, the position observers are used to find the rotor position by estimating the back-EMF [9]. After detecting the rotor position selected commutation procedure is applied to the motor phases.

In literature, 120° , 180° , 150° commutation modes, and space vector modulation (SVM) are the commonly used methods for driving BLDC motors. These commutation modes have some pros and cons according to each other. To mention a few, the detection of zero-crossing points of back-EMF can be easily achieved and extracted from the unenergized phase in 120° commutation mode, while it is not possible in 180° commutation mode since there is no unenergized phase [10]. If the application needs more torque, 180° commutation mode can be preferred because all of the three-phases contribute to torque at each commutation state [11]. If the low harmonic content is needed in the current and voltage waveforms, 150° commutation mode can be used in the applications [12]. Furthermore, if higher torque and speed control is required, the field-oriented control (FOC) is typically utilized in conjunction with sinusoidal

pulse width modulation (SPWM) or SVM. FOC establishes high efficiency and decoupled control of flux and torque [13]. However, its implementation is more complex than the other methods.

The performance comparison of some CMs is studied for two-phase on operation and three-phase on operation mode by considering the switching patterns [14]. In this study, the performance comparison of 120° , 180° , 150° and direct digital synthesis (DDS) based SPWM is realized with the experimental results of the operable speed interval, the current draw, the generated thrust, and the waveforms of line-to-line and phase-to-ground.

The commutation strategies are crucial in the selection of an open-loop starting method, especially in battery-powered applications such as drones. Also, the efficient use of energy sources is an important issue addressed by researchers [15], [16]. With this motivation in mind, the power consumption of frequently used commutation methods such as 120° , 180° , 150° , and DDS-based SPWM, which are detailed in the following sections, are experimentally tested in a real-time environment. The main contributions of the present research can be summarized as follows. To the best of the authors' knowledge the performance comparison of the aforementioned four methods has not been addressed yet in the literature. Also, it is the first time that comparison of DDS algorithm based SPWM method with widely used driving methods for BLDC motor control is realized. According to the comparison results, the proposed DDS-based sine commutation method is more efficient than other commutation methods and has lower power consumption at both low and high speeds also a wider operable speed range. In addition, it is also found that the generated thrust is greater than the other compared methods.

The remainder of the study is organized as follows. The most commonly used commutation modes are explained in section 2. The driver circuit design of the BLDC motor, experimental setup, and implementation details are discussed in section 3. The data gathered from the experiments for each commutation mode are given in section 4. The comparison of commutation modes is realized via a constructed comparison table, and the study is ended with the inferences from the experimental studies in section 5.

2. INVERTER COMMUTATION MODES

(EVİREÇ KOMÜTASYON MODLARI)

A classical three-phase voltage source inverter (VSI) is used to drive BLDC motors according to the selected commutation method. The typical power circuit of VSI is given in Figure 1. Several commutation modes are utilized in the control algorithm of VSI. The selection of these modes is depended on the application requirements (such as smooth operation, torque control, low noise, etc.). In this section, 120°, 180°, 150°, and the DDS-based sine commutation are examined, respectively.

2.1. 120° Commutation Mode (120° Komütasyon Modu)

120° commutation mode is a widely used method to drive a BLDC motor. It is also known as the six-step or trapezoidal commutation mode. Generally, BLDC motor has three-phase stator windings in its

structure. In this mode, the two stator phase windings are always energized and one phase is left unenergized. Energization of phase windings is achieved by switching on one high-side and one low-side switch.

There are six commutation steps given in Figure 3(a). The duration of each commutation step as given in Figure 4 is 60°. In the table, the current conducting and non-conducting switches are denoted by 1 and 0, respectively. In this mode, each switch must be controlled individually. For instance, in the first step of Figure 3(a), S₁ and S₆ are connected to the positive and negative side of the source respectively and they are closed while the other four switches are kept open. This is shown in Figure 3(b). The speed of the motor is adjusted by changing the duration of each commutation step. This commutation mode has an easy implementation and also can be integrated into both the open-loop and closed-loop control algorithms.

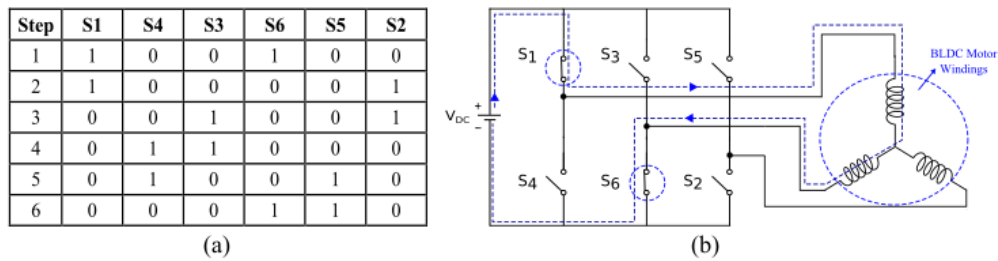


Figure 3. a) Switch states of 120° commutation mode, b) Illustration of first commutation step of the table (a) 120° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri, b) Tablodaki ilk komütasyon adımının gösterimi

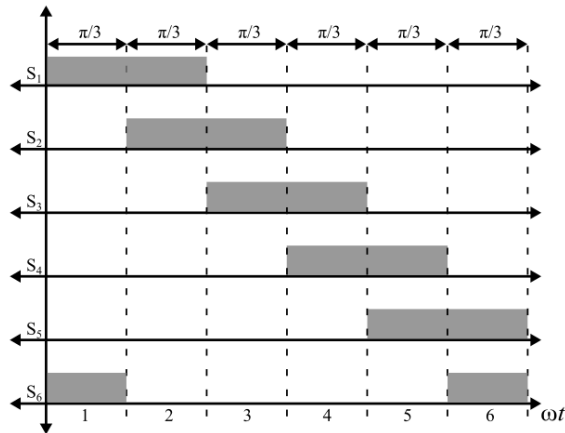


Figure 4. Switch states of 120° commutation mode [12] (120° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri [12])

2.2. 180° Commutation Mode (180° Komütasyon Modu)

180° commutation mode is generally used to control the induction electrical machines and also is used to drive BLDC motor. In this mode, the three stator phase windings are always energized therefore there is no available gap to measure back-EMF directly [17]. There are six commutation steps given in

Figure 5(a). In the table, the current conducting and non-conducting switches are denoted by 1 and 0, respectively. The duration of each commutation step as given in Figure 6 is 60°. The energization of stator windings is achieved by closing the two high-sides and one low-side switches in the first step and one high-side and two low-sides switches in the

second step. In other words, three-switches are always activated.

The operation principle of 180° commutation mode can be explained according to first two commutation step described in Figure 5(a). In the

first step, S₁ and S₃ high-side switches and S₂ low-side switch are closed. In the second step, the S₁ high-side switch is opened and the S₄ low-side switch is closed. This is shown in Figure 5(b). The speed of motor is adjusted by changing the duration of each commutation step.

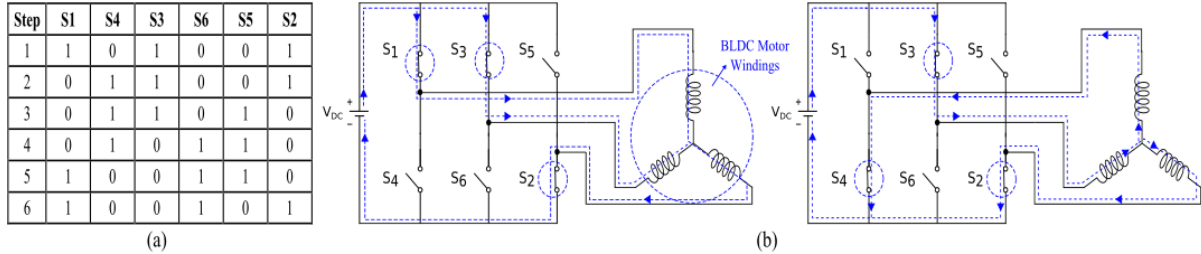


Figure 5. a) Switch states of 180° commutation mode, b) Illustration of first two commutation steps of the table (a) 180° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri, b) Tablodaki ilk iki komütasyon adımının gösterimi

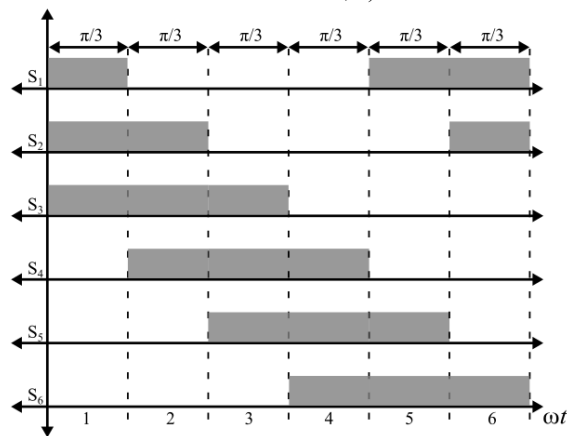


Figure 6. Switch states of 180° commutation mode [12] (180° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri [12])

2.3. 150° Commutation Mode (150° Komütasyon Modu)

150° commutation mode is generally used in the algorithms of inverters and uninterruptable power supplies. It is also used to drive BLDC motor since it reduces torque ripple and has low harmonic content than 120° commutation mode [18]. It can be said that its step sequence is the combination of 120° and 180° commutation modes. It is actualized by inserting each 120° commutation step between consecutive steps of 180° mode. Figure 7(a) depicts the twelve commutation steps in this mode. At the first step, all stator windings are energized whereas just two stator windings are energized at the second step. The energization of phase windings can be explained in three steps. In the first step, two high-side switches and one low-side switch are activated. In the second step, one high-side and one low-side switch are activated and in the third step one high-side and two low-side switches are activated.

In the table, the current conducting and non-conducting switches are denoted by 1 and 0, respectively. The first three-step is explained as follows. In the first step, S₁ and S₃ high-side and S₂ low-side switches are in a closed condition. In the second step, the S₁ high-side switch is opened and the others have remained unchanged. In the third step, S₄ low-side switch is closed and the others have remained unchanged. This commutation scheme is given in Figure 7(b). The duration of each commutation step as given in Figure 8 is 30°. The speed of the motor is adjusted by changing the duration of each commutation step. The advantages of this method relative to 120° and 180° commutation modes are the increasing of RMS output voltage and the creation of a 30° safety margin period to avoid short circuits on the DC supply [12]. This method can also be integrated into the open and closed-loop control algorithms.

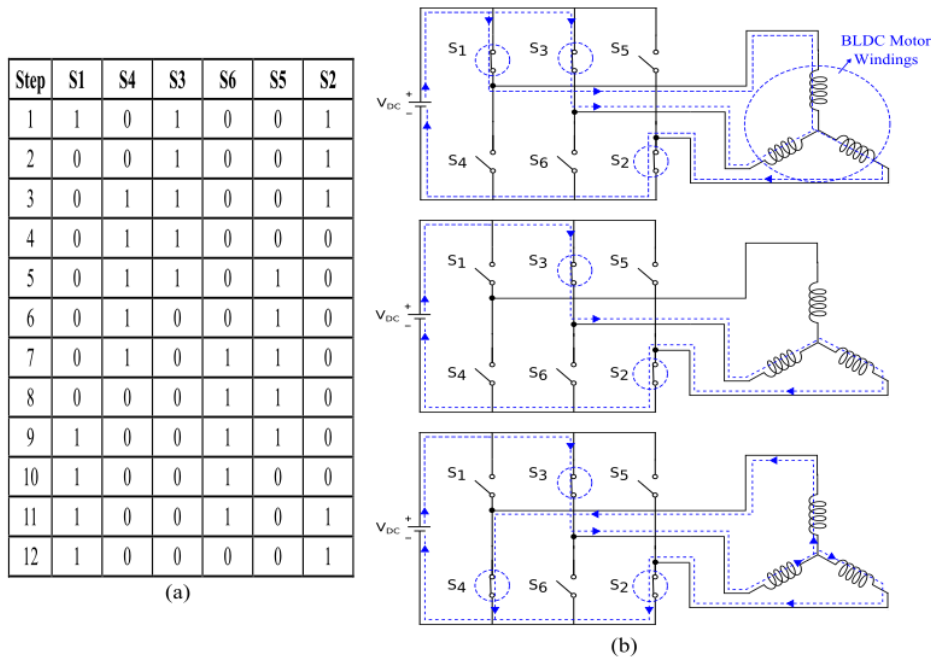


Figure 7. a) Switch states of 150° commutation mode, b) Illustration of first three commutation steps of the table (a) 150° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri, b) Tablodaki ilk üç komütasyon adımının gösterimi)

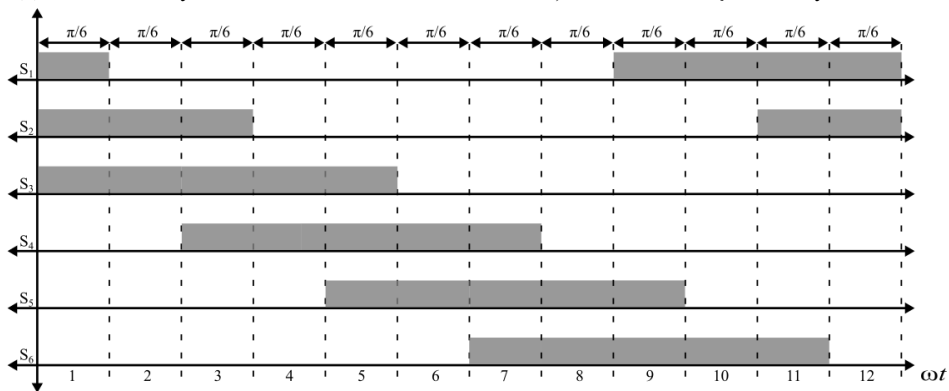


Figure 8. Switch states of 150° commutation mode [12] (150° komütasyon modunun anahtarlama düzenleri [12])

2.4. Sinusoidal Pulse Width Modulation
(Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu)

Pulse width modulation (PWM) is the process to generate high-frequency and variable-length pulse trains that is proportional to the applied control signal [19]. Different PWM techniques have been used in various applications such as variable speed drives (VSD), static frequency changers (SFC) and uninterruptible power supplies (UPS), etc. In the PWM process, variable-length pulses are obtained by comparing the three-phase reference signals with a triangular carrier. The magnitude and frequencies of the output sinusoidal signal can be controlled by changing the magnitude and frequency of the reference signal [20]. Besides the analog method, digital methods such as the direct digital synthesis (DDS) method can be used to generate high-frequency sinusoidal signals.

The DDS method is a way to generate waveforms usually a sine wave by storing waveform properties on a look-up table that is an array in a microcontroller’s memory that holds amplitude information of the waveform being generated. The block diagram of the DDS method is given in Figure 9. The waveform information is stored in Amplitude/Sine Conv. block. It is usually a look-up table of a sine. The phase accumulator computes a phase (angle) address for the look-up table. The look-up table outputs the amplitude value of the phase which is then converted to analog waveform by a digital-to-analog converter (DAC) unit. The frequency of the output waveform can be changed by either modifying the tuning word or reference clock [21].

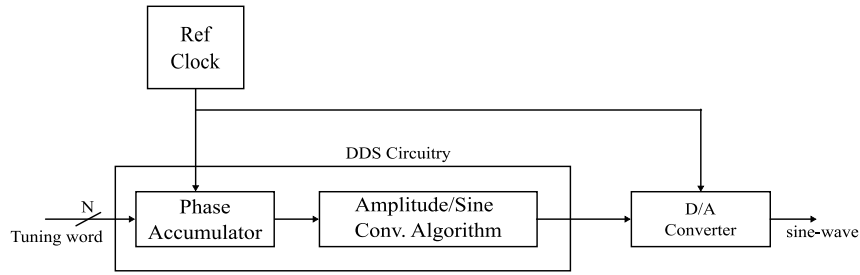


Figure 9. DDS method building blocks (DSS yönteminin temel blokları)

3. MATERIAL AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

A driver circuit that includes the microcontroller (Arduino Nano) is designed in order to control the BLDC motor. The specification of the microcontroller, the circuit schematic, the printed circuit board (PCB) of the driver, and the hardware itself are given in Table 1, Figure 10, Figure 11, and Figure 12 respectively. At the PCB circuit, red and yellow lines represent traces and jumpers, respectively. The driver circuit includes two L298N integrated circuits, a potentiometer, a voltage regulator, diodes, and resistors. L298Ns has four half bridges. Hence, it has the capability of driving four-phase electrical motors. A potentiometer is connected to the microcontroller’s analog input for adjusting the speed of the motor. Also, a back-EMF detection circuit composed of nine resistors is included for future studies. Flywheel diodes are used to protect switching elements from voltage spikes. During the experimental studies, the control

algorithm of each method was examined as an open-loop. During the implementation of 120° and 150° commutation modes, the couple switches (such as S₁ and S₄) can be operated individually (S₁ is closed whereas S₄ is opened) or as a group (S₁ and S₄ are opened or closed at the same time). In 180° commutation mode and the DDS-based SPWM method, switches are operated individually. All methods supply a three-phase sine-wave signal to the stator windings of BLDC.

The experimental setup of this study was given in Figure 13. This setup consisted of a tachometer, precision scale, and sample BLDC motor. BLDC motor is rated at 880rpm/voltage (KV) with an internal resistance of 107mΩ and inductance of 0.005mH. This motor is fixed on the precision scale to measure its thrust. A 10x4.5inch (1045r) propeller was attached to the rotor of the BLDC motor. The tachometer was used to measure the rpm of the motor. All experimental results of each method were taken from this configuration.

Table 1. Arduino nano technical details [22] (Arduino nano teknik detayları [22])

Microcontroller	Atmega328p
Crystal Oscillator	16MHz
Input Voltage	6V-12V
Maximum Current Rating	40mA
D0-D13	Digital Input / Output pins
A0-A7	Analog Input / Output pins
Pin # 3, 5,6, 9, 10, 11	Pulse Width Modulation (PWM) pins
D2 & D3	External Interrupt pins

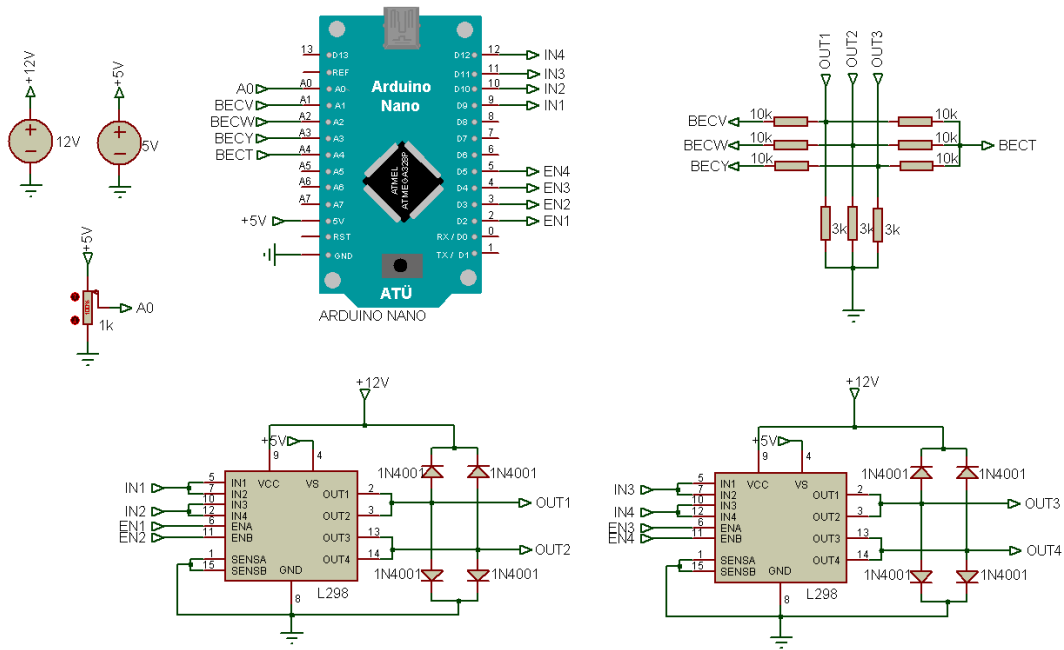


Figure 10. The circuit schematic of inverter circuit (Evireç devresinin devre şeması)

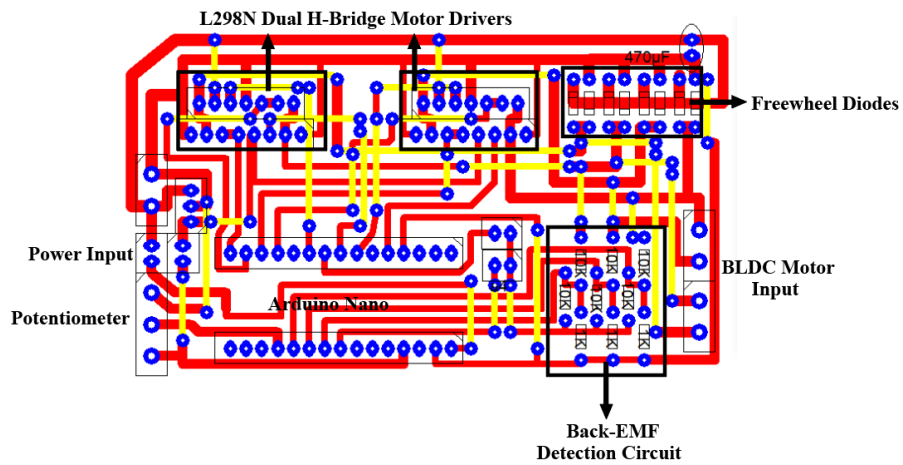


Figure 11. PCB of inverter circuit (Evireç devresinin baskı devresi)

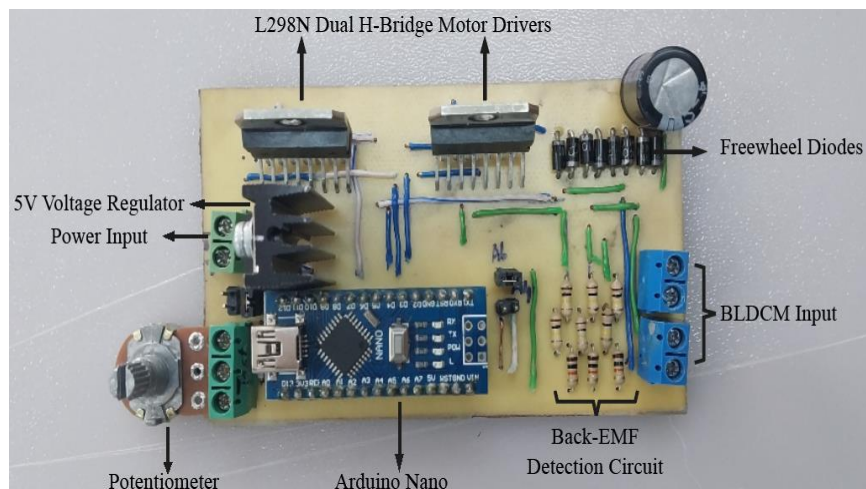


Figure 12. BLDC motor drive circuit (FDAM sürücü devresi)

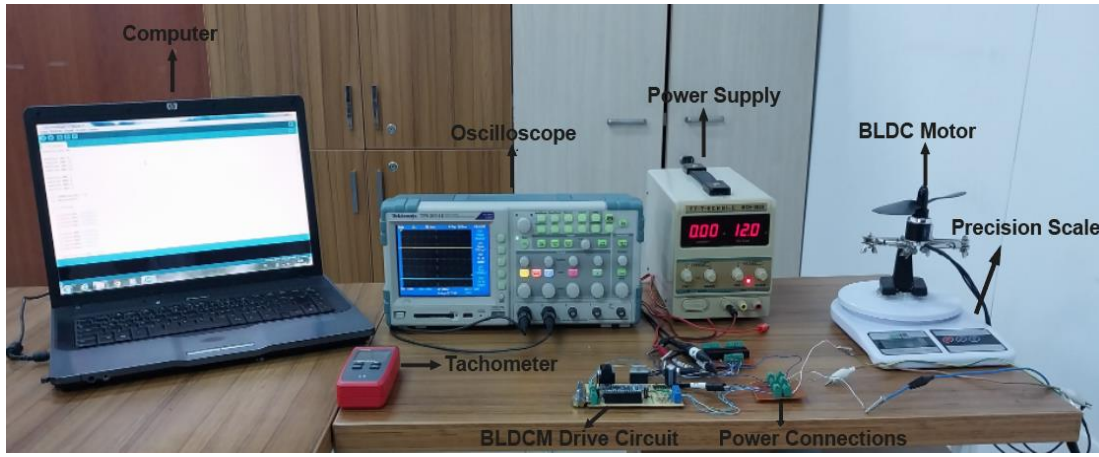


Figure 13. Experimental setup (Deney düzeneği)

4. CASE STUDIES (DURUM ÇALIŞMALARI)

In the experimental cases, each method given above was evaluated by considering the current drawn from the source, thrust, and rpm values for minimum speed and maximum speed. Then, the voltage waveform on the oscilloscope was captured for each method when the BLDC motor was at the highest rpm value. 12VDC is used to energize the driver circuit given in Figure 13. Arduino integrated development environment (IDE) interface was used to upload codes of each method to the microcontroller. The experimental data of each method was gathered and given in the tables with output waveforms. In the table, there are three rows related to current, thrust, and rpm values, respectively. These three parameters are compared for the minimum and maximum speeds which are given in two columns.

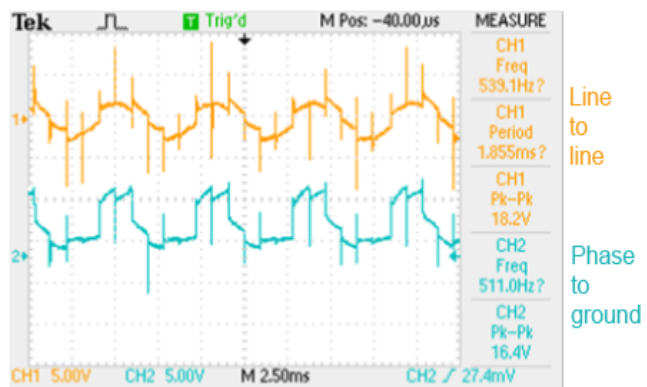
4.1. Case 1: 120° Commutation Mode (Durum 1: 120° Komütasyon Modu)

In this mode, the commutation steps given in Figure 3(a) were applied to the BLDC motor via driver circuit. Minimum and maximum attainable speed was observed. At the minimum speed of 186rpm, the thrust was measured as 0 gram-force (gf) and the current was drawn as 2.45A. At the maximum speed of 1526rpm, the thrust was measured as 33gf and the current was drawn as 2.60A. According to these results, it can be said that the increase of current value was calculated as 6.1%.

The results of minimum/maximum operable speeds and thrust were given in Figure 14(a). The waveforms of the applied voltage to BLDC motor stator windings were given in Figure 14(b). It was taken at the maximum speed with a frequency of 193Hz.

	Minimum Speed Results	Maximum Speed Results
Current (A)	2.45	2.60
Speed (rpm)	186	1526
Thrust (gf)	0	33

(a)



(b)

Figure 14. a) 120° commutation mode results, b) 120° commutation mode waveform at maximum speed
(a) 120° komütasyon modu sonuçları, b) En yüksek hızda 120° komütasyon modu dalga formu)

4.2. Case 2: 180° Commutation Mode (Durum 2: 180° Komütasyon Modu)

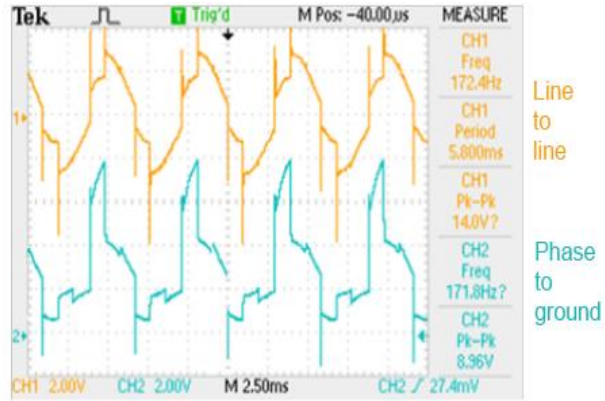
In this mode, the commutation steps given in Figure 5(a) were applied to the BLDC motor via the driver circuit. Minimum and maximum attainable speed is observed. At the minimum speed of 178rpm, the thrust was measured as 0gf and the current was drawn as 3.01A. At the maximum speed of 1480rpm, the thrust was measured as 30gf and the current was drawn as 3.08A. According to these results, a higher current draw was seen than 120°

and 150° commutation modes as expected. Since the three-phases are always active. Also, it can be said that the increase of current value was calculated as 2.32%.

The results of minimum/maximum operable speeds and thrust were given in Figure 15(a). The waveforms of the applied voltage to BLDC motor stator windings were given in Figure 15(b). It was taken at the maximum speed with a frequency of 167Hz.

	Minimum Speed Results	Maximum Speed Results
Current (A)	3.01	3.08
Speed (rpm)	178	1480
Thrust (gf)	0	30

(a)



(b)

Figure 15. a) 180° commutation mode results, b) 180° commutation mode waveform at maximum speed
(a) 180° komütasyon modu sonuçları, b) En yüksek hızda 180° komütasyon modu dalga formu)

4.3. Case 3: 150° Commutation Mode (Durum 3: 150° Komütasyon Modu)

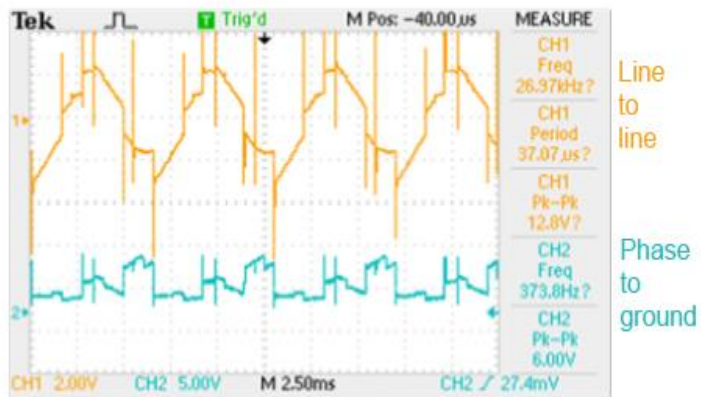
In this mode, the commutation steps given in Figure 7(a) were applied to the BLDC motor via the driver circuit. Minimum and maximum attainable speed is observed. At the minimum speed of 178rpm, the thrust was measured as 0gf and the current was drawn as 2.73A. At the maximum speed of 1327rpm, the thrust was measured as 25gf and the

current was drawn as 2.90A. According to these results, it can be said that the increase of current value was calculated as 6.2%.

The results of minimum/maximum operable speeds and thrust were given in Figure 16(a). The waveforms of the applied voltage to BLDC motor stator windings were given in Figure 16(b). It was taken at the maximum speed with a frequency of 153Hz.

	Minimum Speed Results	Maximum Speed Results
Current (A)	2.73	2.90
Speed (rpm)	178	1327
Thrust (gf)	0	25

(a)



(b)

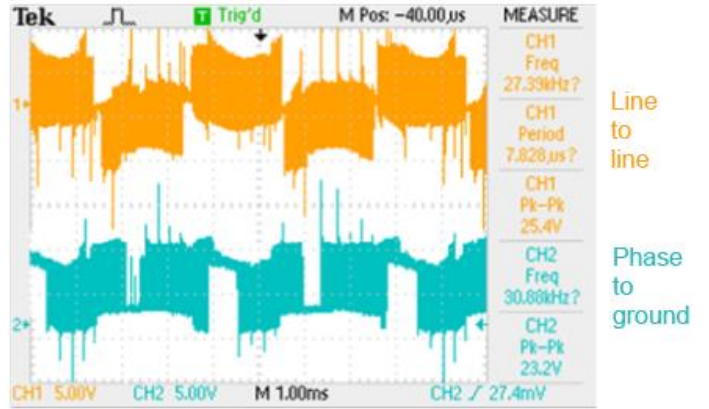
Figure 16. a) 150° commutation mode results, b) 150° commutation mode waveform at maximum speed
(a) 150° komütasyon modu sonuçları, b) En yüksek hızda 150° komütasyon modu dalga formu)

4.4. Case 4: Direct Digital Synthesis Based SPWM Method (Doğrudan Sayısal Sentez Tabanlı Sinüzoidal DGM Yöntemi)

In this case study, the DDS algorithm was applied to the SPWM method and then, it was used to control the BLDC motor [23]. The switching sequences of DDS-based SPWM are the same with 180° commutation mode. At the experimental setup, the reference clock was taken as 1024Hz and the timer1 interrupt of Arduino was adjusted to generate a 30.88kHz waveform given in Figure 17(b). Then, the duty cycle of PWM was changed by using the lookup table of the sine function. In this lookup table, the value of the sinusoidal waveform ranged from 0 to 255. The potentiometer was used to adjust the tuning word. Hence, the frequency of the output signal was changed.

	Minimum Speed Results	Maximum Speed Results
Current (A)	2.38	1.98
Speed (rpm)	143.8	2116
Thrust (gf)	0	70

(a)



(b)

Figure 17. a) DDS method results, b) DDS method waveform at maximum speed (a) DSS yöntemi sonuçları, b) En yüksek hızda DSS yöntemi dalga formu)

5. CONCLUSION (SONUÇLAR)

Nowadays, BLDC motors have been replacing other three-phase electrical motors in many fields such as drones, household appliances, aerospace, office automation, automotive applications, etc. due to their high efficiency, low maintenance requirement, and high torque-to-weight ratio. They are controlled by six-pulse inverter-based drivers. To commute the inverter switches, the 120° method is generally preferred by considering back-EMF induced on the unenergized phase of the BLDC. Also, 180° mode, 150° mode, and the sinusoidal-based methods are used according to the application requirements.

In this study, the performance comparison of 120°, 180°, 150° modes, and DDS-based SPWM was examined. It is the first time to observe the performance comparison of the previously described four methods in the literature. In this

In this mode, the commutation steps given in Figure 5(a) were applied to the BLDC motor via the driver circuit. Minimum and maximum attainable speed was observed. At the minimum speed of 143.8rpm, the thrust was measured as 0gf and the current was drawn as 2.38A. At the maximum speed of 2116rpm, the thrust was measured as 70gf and the current was drawn as 1.98A. According to these results, it can be said that the decrease in current value was calculated as 16.8%.

The results of minimum/maximum operable speeds and thrust were given in Figure 17(a). The waveforms of the applied voltage to BLDC motor stator windings were given in Figure 17(b). It was taken at maximum speed with a frequency of 250Hz.

context, it is the first time that a comparison of the DDS algorithm based SPWM method with widely used driving methods for BLDC motor control was realized. For the case studies, a simple and low-cost drive circuit was designed. According to the results, ripples on voltage waveforms when changing to a new commutation state were observed. Also, a performance comparison of case studies was given in Table 2. It is clearly revealed that the DDS method has performed better in terms of lower power consumption, higher thrust, lower operable speed, and wider speed range than the other methods. It can be concluded that the DDS method is more efficient than other commutation methods. Therefore, it is a suitable control method to utilize in appliances. In addition, 180° mode has drawn more current as expected because three windings are energized at all times.

Table 2. Performance comparison of case studies (Durum çalışmalarının performans karşılaştırması)

Method	Current at Minimum Speed (A)	Current at Maximum Speed (A)	Minimum Speed (rpm)	Maximum Speed (rpm)	Thrust at Maximum Speed (gf)
120°	2.45	2.60	186	1526	33
150°	2.73	2.90	178	1327	25
180°	3.01	3.08	178	1480	30
DDS-based SPWM	2.38	1.98	143.8	2116	70

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was produced from Emre YORAT's MSc thesis [22] and it was financially supported by the Scientific Research Unit of Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University under the project number 21303007.

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)

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

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

Necdet Sinan ÖZBEK: He contributed the writing process and analyzed the results.

Sonuçların analizi ve makale yazım aşamasında katkıda bulunmuştur.

Lütfü SARIBULUT: He contributed in the algorithm design and the writing process.

Algoritma tasarımı ve makale yazım aşamasında 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] Xia C. L., Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. 2012.
- [2] Çetinceviz Y., Şehirli E., Neutrosophic Fuzzy Logic Controller Based Speed Control of PMSM fed by Bidirectional Battery Charger with Buck-Boost MPPT, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 10 No. 4 (2022) 666–681.
- [3] Alias A., Overview of Brushless D.C Motor: Construction and Application, International Journal for Technological Research in Engineering, 7 No. 8 (2020) 6669–6675.
- [4] Gamazo-Real J. C., E. Vázquez-Sánchez, Gómez-Gil J., Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends, Sensors, 10 No. 7 (2010) 6901–6947.
- [5] Li H., Zheng S., Ren H., Self-Correction of Commutation Point for High-Speed Sensorless BLDC Motor with Low Inductance and Nonideal Back EMF, IEEE Transactions on Power Electronics, 32 No. 1 (2017) 642–651.
- [6] Xiao G., Tu W., Suo C., Tang L., Yang K., Research and design of speed control for high speed sensorless brushless DC motor with commutation compensation, 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, (2017) 12–15.
- [7] Attar A., Bouchnaif J., Grari K., Control of Brushless DC motors using sensorless Back-EMF integration method, Materials Today: Proceedings, 45 No. 8 (2021) 7438–7443.
- [8] Song X., Han B., Zheng S., Fang J., High-Precision Sensorless Drive for High-Speed BLDC Motors Based on the Virtual Third Harmonic Back-EMF, IEEE Transactions on Power Electronics, 33 No. 2 (2018) 1528–1540.
- [9] B. Saha, B. Singh, Back EMF Observer Based Sensorless BLDC Motor Drive with SEPIC Converter for EV Application, 2021 IEEE 6th

- International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2021, (2021) 94–99.
- [10] Ho T. Y., Huynh C. K., Lin T. H., Yang S. W., The design and implementation of a sensorless power tool based on a microcontroller, *Electronics (Switzerland)*, 9 No. 6 (2020) 1–22.
- [11] Hu B., Sathiakumar S., Shrivastava Y., 180-Degree Commutation System of Permanent Magnet Brushless Dc Motor Drive Based on Speed and Current Control, 2009 2nd International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation, ICICTA 2009, 1 (2009) 723–726.
- [12] Saied M. H., Mostafa M. Z., Abdel- Moneim T. M., Yousef H. A., On three-phase six-switches voltage source inverter: A 150° conduction mode, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2 (2006) 1504–1509.
- [13] Gujjar M. N., Kumar P., Comparative analysis of field oriented control of BLDC motor using SPWM and SVPWM techniques, *RTEICT 2017 - 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology*, Proceedings, (2017) 924–929.
- [14] Damiano A., Deiana F., Fois G., Gatto G., Marongiu I., Serpi A., Performance comparison between two-phase-on and three-phase-on operation of Brushless DC drives, 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2014, (2014) 489–494.
- [15] Ho T., Chen M. S., Lin W. L., The design of a high power factor brushless DC motor drive, 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, (2012) 345-348.
- [16] Jin C. S., Kim C. M., Kim I. J., Jang I., Proposed commutation method for performance improvement of brushless DC motor, *Energies*, 14 No. 19 (2021) 6023.
- [17] Noroozi M. A., Monfared M., Sensorless Starting Method for Brushless DC Motors using 180 Degree Commutation, 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), (2012) 57–61.
- [18] Promthong S., Konghirun M., Sensorless control of BLDC motor drive with 150° conducting mode to minimize torque ripple, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS 2013, (2013) 1004–1009.
- [19] Jose L. A., Karthikeyan K. B., A Comparative Study of Sinusoidal PWM and Space Vector PWM of a Vector Controlled BLDC Motor, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2 No. 6 (2013) 2662–2668.
- [20] Kumar V. N., Michael P. A., John J. P., Kumar S. S., Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 No. 7 (2010) 61–74.
- [21] Murphy E., Slattery C., All about direct digital synthesis, *Analog Dialogue*, 38 No. 3 (2004) 8–12.
- [22] Yorat E. (2022). Sensorless brushless DC motor drive design and performance comparison of different control methods, *Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana*.
- [23] PWM Sine Wave Generation. https://home.csulb.edu/~hill/ee470/Lab_2d-Sine_Wave_Generator.pdf.

Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper Tasarımı ve Geometrik Optimizasyonu

Hakan DOĞAN¹ , İsmail ŞAHİN^{2,*} , Zekeriya PARLAK³ 

¹Hidromek Corp., Department of R&D., 06935, Sincan/ANKARA

²Sakarya University of Applied Sciences, Arifiye Vocational School, Department of Electronic and Automation, 54580, Arifiye/ SAKARYA

³Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 54187, Serdivan/SAKARYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2022
Düzeltilme: 02/04/2023
Kabul: 10/04/2023

Anahtar Kelimeler

Kısıtlı Açılı Dönel MR
Damper
MR sıvı
Hesaplamalı Akışkanlar
Mekanik
Tork Sönümü

Article Info:

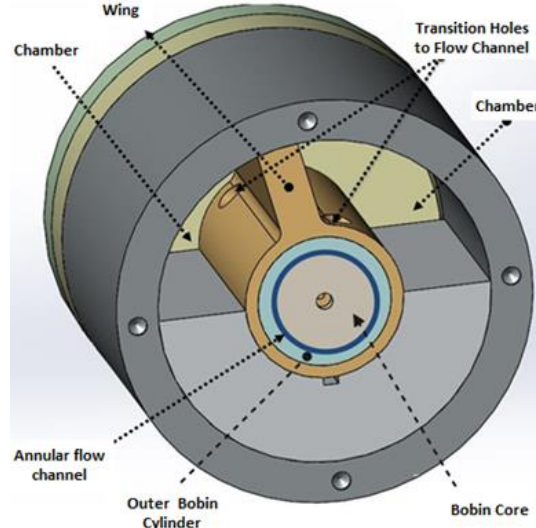
Research article
Received: 08/12/2022
Revision: 02/04/2023
Accepted: 10/04/2023

Keywords

Limited Angle Rotary MR
Damper
MR fluid
Computational Fluid
Dynamics
Torque damping

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

A Limited Angle Rotary (LAR) MR damper is a device in which a magnetic field is applied to the MR fluid in a suitable flow region while transferring the MR fluid from one chamber to another in an angularly restricted rotational motion. / Kısıtlı Açılı Dönel (KAD) MR damper, açısal olarak kısıtlanmış dönme hareketiyle MR akışkanı bir hazneden diğerine aktarırken, MR akışkana uygun bir akış bölgesinde manyetik alan uygulandığı bir cihazdır.



Şekil A: KAD-MR Damper geometrisi / Figure A: LAR-MR Damper geometry

Önemli noktalar (Highlights)

- Geometrik Optimizasyon / Geometric optimization
- Manyetik Analiz ile MR bobin tasarımı / MR coil design with Magnetic Analysis
- ANSYS Fluent ile MR akış analizi / MR flow analysis with ANSYS Fluent

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, sınırlı bir açıda yüksek tork üretebilen ve tork kontrolüne uygun sınırlı açılı bir dönel MR damper tasarlamaktır. / The aim of this study is to design a rotary damper capable of producing high torque at a limited angle and suitable for torque control.

Özgünlük (Originality): Geleneksel damperlerin aksine bu kısıtlı dönel MR damper tasarımında manyetik alanın oluşturulduğu akış bölgesi, damperin merkezinde tasarlanmıştır. Böylece daha küçük bir geometri elde edilmiştir. / Unlike conventional dampers, in this limited rotary MR damper design, the flow region where the magnetic field is generated is designed at the center of the damper. This results in a smaller geometry.

Bulgular (Results): Analiz sonuçları incelendiğinde, verilen kısıtlar dahilinde hedeflenen tork değerine ulaşılabileceği gösterilmiştir. / When the analysis results are analyzed, it is shown that the targeted torque value can be achieved within the given constraints.

Sonuç (Conclusion): Kısıtlı açılı dönel MR damperin kavramsal tasarım aşamasında tanımlanan 90 Nm hedef tork değerine ulaşmak için yapılan manyetik alan ve akış analizleri ile gerekli geometrik ve bobin parametreler elde edilmiştir. / In order to achieve the target torque value of 90 Nm defined in the conceptual design phase of the restricted angle rotary MR damper, the necessary geometric and coil parameters were obtained through magnetic field and flow analysis.



Limited Angle Rotary Magneto-Rheological Damper Design and Geometry Optimization

Hakan DOĞAN¹ , İsmail ŞAHİN^{2,*} , Zekeriya PARLAK³

¹Hidromek Corp., Department of R&D., 06935, Sincan/ANKARA

²Sakarya University of Applied Sciences, Arifiye Vocational School, Department of Electronic and Automation, 54580, Arifiye/ SAKARYA

³Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 54187, Serdivan/SAKARYA

Article Info

Research article
Received: 08/12/2022
Revision: 02/04/2023
Accepted: 10/04/2023

Keywords

Electro Discharge
Machining
Ti-6Al-4V Alloy
Keyseat
Measurement Accuracy

Abstract

Magneto-Rheological (MR) fluid are a type of smart materials that, when excited by a suitable magnetic field, produce very rapid and reversible changes in their apparent viscosity. The ease of controlling the magnetic field allows these liquids to be used as dampers. Today, there are linear damper (damper, shock absorber) and rotary damper (clutch, brake, etc.) designs using these fluids. Limited Angle Rotary MR (LAR-MR) damper is a device in which the MR fluid is exposed to a magnetic field in a defined flow region while transferring the MR fluid from one chamber to another chamber with an angularly restricted rotational motion. In this study, the conceptual design of a new LAR-MR damper was carried out and the design parameters affecting the torque performance were determined with the help of computational fluid dynamics (CFD) to determine the most suitable design parameters for the target values.

Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper Tasarımı ve Geometrik Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2022
Düzeltilme: 02/04/2023
Kabul: 10/04/2023

Anahtar Kelimeler

Elektro Deşarj
İşleme
Ti-6Al-4V Alaşım
Kama Yuvası
Ölçüm Doğruluğu

Öz

Manyeto-Reolojik (MR) sıvı uygun bir manyetik alan ile uyarıldığında, görünür viskozitelerinde çok hızlı ve tersinebilin değişimler elde edilen, akıllı malzemelerin bir türüdür. Manyetik alanın kontrolünün kolay olması sebebiyle, bu sıvıların sönümleyici olarak kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Günümüzde bu sıvıların kullanıldığı doğrusal damper (sönümleyici, amortisör) ile, dönel damper (kavrama, fren gibi) tasarımları mevcuttur. Kısıtlı Açılı Dönel MR (KAD-MR) damper ise, açılabilir sınırlanmış dönme hareketiyle MR sıvıyı bir bölmeden diğer bölmeye aktarırken, belirlenen akış bölgesinde MR sıvının manyetik alana maruz bırakıldığı cihazdır. Bu çalışmada yeni bir KAD-MR Damperin kavramsal tasarımı yapılarak ve tork performansını etkileyen tasarım parametrelerinin, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla, belirlenen hedef değerler için en uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

MR sıvı, taşıyıcı bir sıvı (silikon veya hidrokarbon yağ vb.) genellikle 1-10 μm çaplarında, manyetize olabilen küresel biçimli parçacıklardan oluşmaktadır. MR sıvının manyetik alan etkisi altında milisaniyeler içinde Reolojik özelliklerinin değişimi, akış özelliklerinin manyetik alanla kontrol edilebilmesinden dolayı uygulamada dikkati çekmektedir. MR sıvının yarı aktif titreşim kontrol

sistemleri için uygulanabilir olmasının anlaşılmasından sonra bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. MR sıvılar yaygın olarak damper (amortisör) [1-4], fren, kavrama, şok emme gibi sistemlerde uygulama alanı bulmaktadır [5-8].

Dönel MR damper, belirlenen bir açılabilir hızda dönerken, belirli kontrol bölgelerinde de MR sıvıya uygulanan manyetik alan ile MR sıvının görünür viskozitesinin değiştirilerek tork kontrolünün

sağlandığı yarı aktif kontrol elemanlarıdır. Dönel MR Damperde çıkış parametresi, sönüm kuvveti yerine sönüm momenti [9] olarak ifade edilmektedir. Yapısal tasarımına göre dönel MR damper sürekli açılı ve kısıtlı açılı (KAD-MR) olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Sürekli açılı dönel MR damper silindir tip ve disk tip olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [10].

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha çok sürekli dönme hareketi yapan kavrama veya fren sistemleri göze çarpmaktadır. Yapılan çalışmalar MR Fren ve/veya kavramanın matematiksel modelinin kurulması [11], çeşitli modeller dikkate alınarak sönüm performansının incelenmesi [12] veya MR fren veya kavramanın sönümlenme performansını etkileyen faktörlerin en uygun parametrelerini, çeşitli araçlarla bulmaya amaçlayan [6,13,14] gibi çalışmalar olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ve deneysel test çalışmalarının yapıldığı bir diğer çalışmada ise Giorgetti ve ark., kanal genişliğinin gövde üzerinde ve kanadın dönüş eksenine dik olacak şekilde bir valfin içinde olduğu tasarımlarında, kanadın çalışma açısı $\pm 7^\circ$ aralığında değiştirerek, 3A'de 200 Nm'ye kadar tork değeri elde etmişlerdir [15]. Bu konudaki diğer bir çalışmada ise, bir arazi aracı için kullanılan damper gövdesinin üzerinde halkasal akışa sahip valf tasarlayıp, elektromanyetik bobini iç radyal akış yoluna yerleştirdikleri bir KAD-MR Damper tasarlanmış ve sonlu elemanlar yardımıyla optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [16].

Zhang ve ark. kısıtlı açılı dönel damperin yarı aktif süspansiyon sistemleri için uygulanabilirliğini, hidrolik çift kanatlı KAD-Damperin yapısını KAD-MR Dampere dönüştürerek incelemişlerdir. Ayrıca dönme momenti üzerine MR etkisini incelemek için matematiksel modeli geliştirilmiştir [17].

Dönel damperlerin bir diğer uygulaması ise koltuk süspansiyon sistemleridir. Deng ve ark. sürücü koltuklarındaki titreşimi azaltmak ve sınır takozlarına çarpma sonucu oluşan darbelerden kaçınmak için değişken sertlik ve değişken sönümlü döner Manyeto Reolojik (MR) amortisörler tasarımı üzerinde çalışmışlardır [18]. Bu tasarımın koltuk süspansiyonunun titreşim zayıflatma performansı, üç titreşim uyarımı, yani harmonik uyarıma, çarpma uyarımı ve rastgele uyarıma altında sayısal ve deneysel olarak değerlendirildi. Hem sayısal hem de deneysel sonuçlar, koltuk süspansiyonunun titreşim kontrol performansının döner MR amortisörleri ile önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Son yıllarda dönel damperlerin protez uygulamalarında araştırılan bir diğer konudur. Saini ve ark. [19] sağlıklı bir insan dizine uygun olarak döner kanatlı Manyeto Reolojik damper tasarlanmıştır. Normal insan dizinin tork ve açısal hız gereksinimleri tasarım limitleri olarak kullanıldığı bu çalışmada çok plakalı MR fren uygulamalarına göre daha uygun bir tasarım elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmaya özgün olarak, manyetik alan uygulama bölgesi silindirin merkezinde tasarlanmıştır. Buna paralel olarak KAD-MR Damperin hem çalışma açısını hem de tork sönüm değerinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda dönel MR Damperin kavramsal tasarımı belirlenmiş, sonrasında dinamik modeli oluşturulmuş ve daha sonra akış ve manyetik alan analizleri yardımıyla geometrik optimizasyonu yapılarak maksimum tork sönümünü verecek olan en uygun prototip boyutları belirlenmiştir. Ayrıca damperin tork değeri üzerinde etkili tasarım parametrelerinin etkileri bulunmuştur.

2. KAD-MR DAMPER'İN TASARIMI (DESIGN OF LAR-MR DAMPER)

KAD-MR Damper iki ana bölümden oluşmaktadır, ilki MR sıvıya depo görevi de yapan ve bir dönel kanat yardımıyla ikiye ayrılan kanat bölgesi, diğeri ise MR sıvının bir bölümden diğerine geçerken manyetik alana maruz bırakıldığı ve sıvının görünür viskozitesinin değiştirildiği çekirdek bölgesinden oluşmaktadır. Kanat bölgesinde MR sıvı herhangi bir manyetik alana maruz kalmayıp, sadece dönme hareketiyle kanat MR sıvıyı bir odacıktan diğer odacığa harekete zorlamaktadır. (Şekil 1). Her iki sıvı odacığı çekirdek bölgesinden geçen halkasal bir kanal vasıtasıyla birbirine bağlıdır. Çekirdek bölgesinin her iki ucu kanat üzerindeki delikler aracılığıyla odacıklara açılmaktadır. Kanat hareketinin dönme yönüne göre MR sıvı çekirdek bölgede hareket etmektedir.

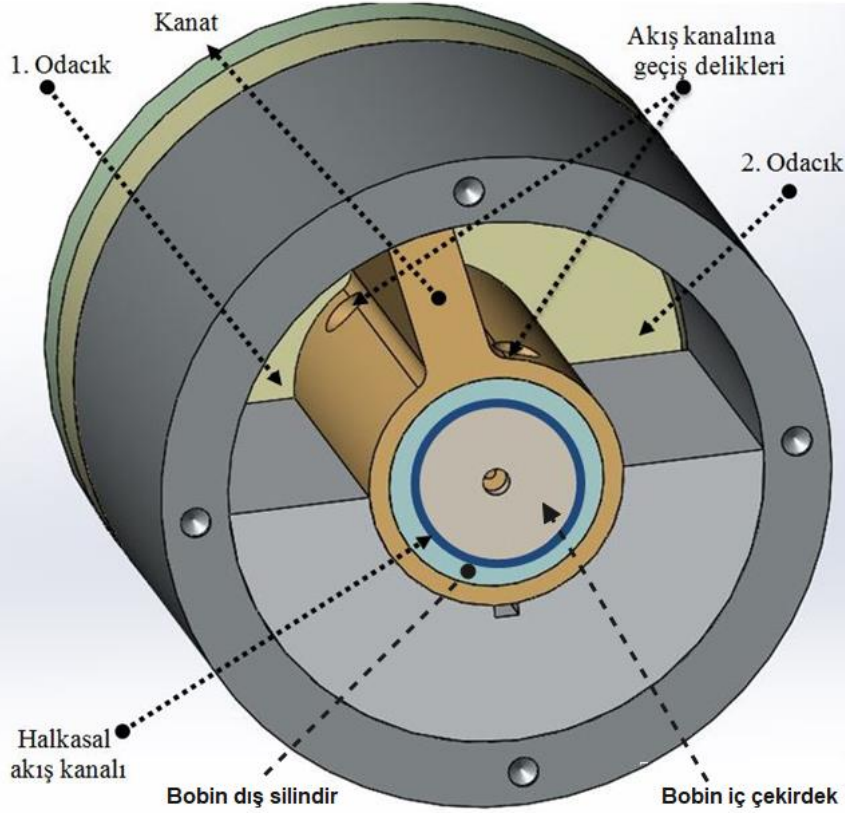
Çekirdek bölgesinde yerleştirilmiş olan bir elektromanyetik bobin yardımı ile MR sıvının geçeceği halkasal bölgenin belirli bir kısmında manyetik alan oluşturulmaktadır. Manyetik alan uygulanmadığı durumda, kanat hareketi ile bir odacıktan diğer odacığa sıvı hareketine sadece viskoz kuvvetler ve sürtünme kuvvetleri engellemeye çalışır.

Bu kuvvetlerin büyüklüğü sıvının viskozitesine, sıcaklığına, kanadın hızına ve geometrik yapıya bağlıdır. Manyetik alan uygulandığında ise kanat hareketi ile çekirdek bölgesindeki halkasal kesitten

akmaya zorlanan MR sıvının akma gerilmesi, manyetik alan uygulanması ile manyetik alanın şiddetine bağlı olarak birkaç milisaniye içinde hızla artar ve akım verildiği müddetçe bu durum devam eder. Şekil 1’te KAD-MR Damperin genel tasarım geometrisi gösterilmiştir.

MR Damper, MR fren, MR kavrama gibi yarı aktif cihazlarda amaç, düşük bir elektrik gücüyle

istenilen fonksiyonu yerine getirerek maksimum verimi elde etmektir. En yüksek verime ulaşabilmek için MR sıvının akma gerilmesini en üst seviyeye çıkarabilmek gerekir. Bu amaçla en uygun manyetik alan şiddetini, en uygun akış ile elde edebilmek amacıyla bu çalışmada hem manyetik alan analizi hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözüm yöntemleri ANSYS paket programı kullanımıyla araştırılmıştır.



Şekil 1. KAD-MR Damper geometrisi (LAR-MR Damper geometry)

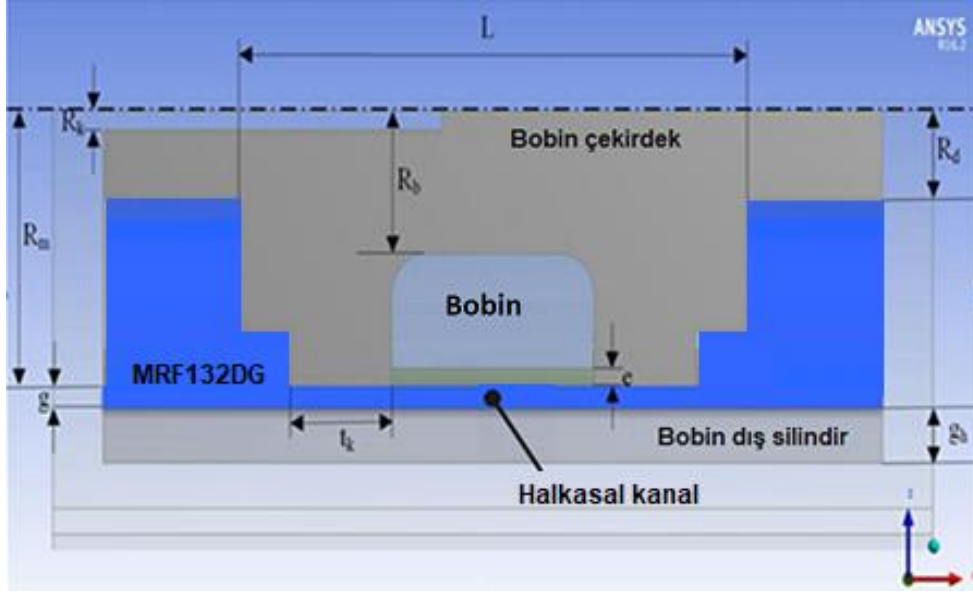
3. KAD-MR DAMPERİN MANYETİK ALAN ANALİZİ (MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF LAR-MR DAMPER)

Manyetik alan analizindeki amaç, çekirdek bölgesindeki halka kesitli akış bölgesindeki manyetik alan yoğunluğunun en uygun değerini bulmaktır. Bu sebeple MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı halkasal bölge ANSYS Magnetostatic’de üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analizlerde, geometrik büyüklüklerin manyetik alana olan etkisini inceleyebilmek için geometrik parametrelerin birer değişken olarak tanımlandığı parametrik tasarım yapılmıştır. Manyetik alan analizine ait geometrik parametreler Şekil 2’de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

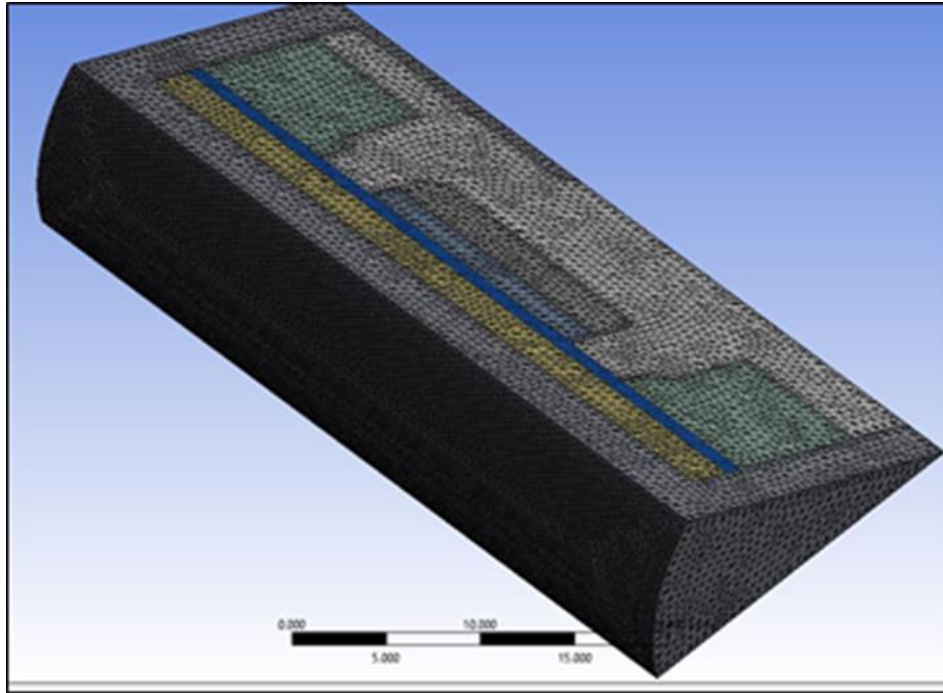
Manyetik alanın meydana geldiği bölge aksel simetrik olduğundan, hesaplama sürecini kısaltmak ve daha hızlı sonuca ulaşmak için tüm geometrinin 30°’lik bir dilimi analiz edilmiştir. Manyetik alan analizi için çözüm ağı geometrisi 346.000 düğüm ve 203.000 dört yüzeyle (tetrahedral) hacim elemanına bölünerek oluşturulmuştur (Şekil 3).

KAD-MR damperde, MR akışkanı olarak Lord firmasının ürettiği MRF-132DG sıvısı kullanılmıştır [20]. Analizler için gerekli olan manyetik akı yoğunluğu (B)-manyetik alan şiddeti (H) verisi MRF-132DG’in üretici firma kataloğundan alınmıştır (Şekil 4). Bu çalışmada mil ve makara malzemesi için St37 çeliği kullanılmış olup, B-H eğrisi Şekil 5’te gösterilmiştir [21]. Bobin ile MR sıvının temasını kesmek için bağlı manyetik geçirgenliği 1 olan epoxy macun kullanılmıştır.

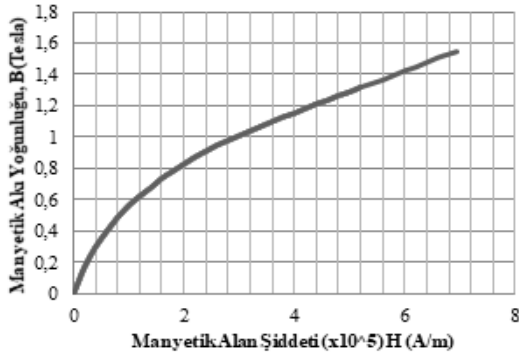
Manyetik alan analizindeki amaç fonksiyonu, en düşük akımda en yüksek manyetik akı yoğunluğunu elde edebilmektir.



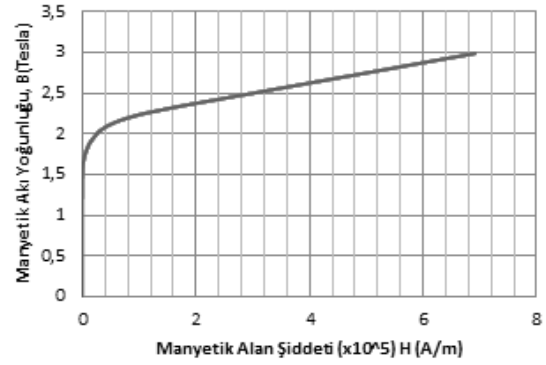
Şekil 2. Manyetik alan analiz geometrisi üzerindeki tasarım parametreleri (Design parameters on the magnetic field analysis geometry)



Şekil 3. Manyetik alan analizi için oluşturulan çözüm ağı (Solution mesh created for magnetic field analysis)



Şekil 4. MRF-132DG 'ye ait B-H grafiği (B-H graph of MRF-132DG)



Şekil 5. St37 çeliğine ait B-H grafiği (B-H graph of St37 steel)

Manyetik akı yoğunluğu (B) ile sıvının akma gerilmesi (τ_y) arasındaki ilişkiyi tanımlamak için MRF 132DG [20] kodlu MR sıvının teknik broşüründe doğrudan bir eğri tanımlaması bulunmamaktadır. Bu ilişkiyi tanımlamak için MR sıvıya ait $B-H$ ve $H-\tau_y$ grafiklerinden elde edilen veriler kullanılarak, en küçük kareler regresyonu yöntemi elde edilen Denklem (1) [22], akış analizinde kanaldaki sıvı davranışını tanımlamak için kullanılmıştır.

$$\tau_y = 52.962B^4 - 176.51B^3 + 158.79B^2 + 13.708B + 0.1442 \quad (1)$$

Bu denklemde, B , Tesla ve τ_y ise KPa birimlerindedir. Denklem (1) ile MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölgedeki akma gerilmesi değeri elde edilmektedir. Amaç fonksiyonunu uygulayabilmek için Tablo 1'deki geometrik boyutların alt ve üst limit değerleri dikkate alınarak ANSYS "Response Surface Optimization" (RSO) modülüyle 136 adet çözüm yapılmıştır.

Tablo 1. Geometrik parametrelerin sınır değerleri (Limit values of geometric parameters)

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır
L (Bobin çekirdek genişliği)	28mm	32mm
g (Halka kanal yüksekliği)	0,4mm	1mm
g_h (Dış dilindir yüksekliği)	2,5mm	4,1mm
R_m (Bobin çekirdeği yüksekliği)	11,5mm	12,5mm
R_b (Bobin iç çapı)	4,5mm	6,5mm
t_k (Kutup başı genişliği)	4mm	6mm
I (Uygulanan akım)	0,25A	2A
N_c (Bobin sarım sayısı)	100 tur	160 tur

Bu modülün kullanımı sayesinde çıkış parametrelerinin giriş parametrelerine göre değişimi de elde edilebilmiştir. RSO modülünde Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) kullanılarak amaç fonksiyonu sağlayacak olan

optimum tasarım için parametre değerleri belirlenmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar kapsamında bobinin sarıldığı çekirdeğe 0,5 mm çaplı emaye kaplı bobin telinden 23 sıra yatay, 7 sıra üst üste olacak şekilde 160 tur bobin teli sarılacaktır.

Tablo 2. Optimize edilmiş geometrik parametre değerler (Optimized geometric parameter values)

t_k	g	g_h	R_m	R_b	L	N_c	I (A)
4	0,55	2,95	12,5	6,5	30	160	1,70

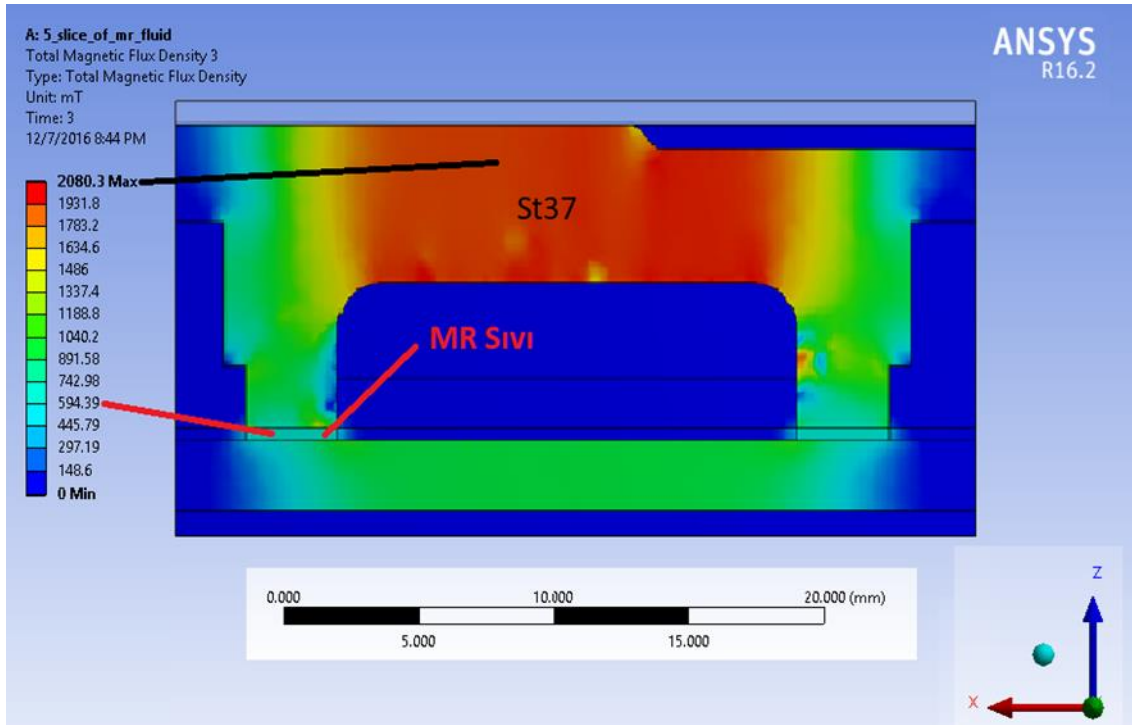
Optimum geometrik değerlere göre yapılan manyetik alan analizi sonucunda elde edilen grafik Şekil 6'da verilmiştir. KAD-MR Damperin

çekirdek bölgesi St37 malzeme üzerinde 2.08 T, MR sıvı üzerinde ise yaklaşık 0,6 T manyetik akı şiddeti elde edildiğini görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde çelik malzeme üzerinde oluşan

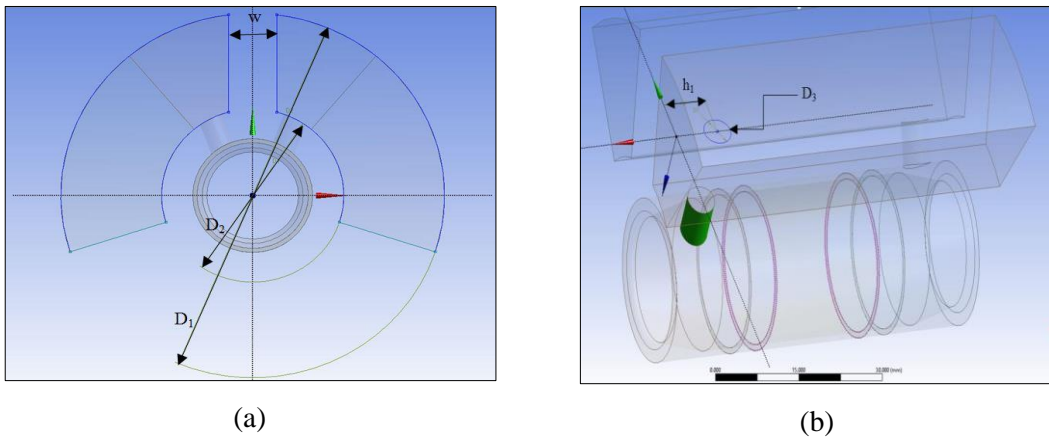
manyetik akı yoğunluğu 2 T değerinden sonra artık duyarlılığını kaybetmeye başlamıştır. Daha fazla manyetik alan şiddeti için harcanan elektrik enerjisi ısı olarak dönüşeceği için bu değer yeterli görülmüştür. Benzer olarak MR sıvı üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu da yaklaşık 32 kPa değerinde bir akma gerilmesi oluşturmaktadır. MRF 132DG'nin B-H grafiğinden bu manyetik akı yoğunluğunda yaklaşık 110 kA/m manyetik alan şiddeti elde edilecektir. Bu değer akış modelinde sıvının tanımlanmasında kullanılacaktır.

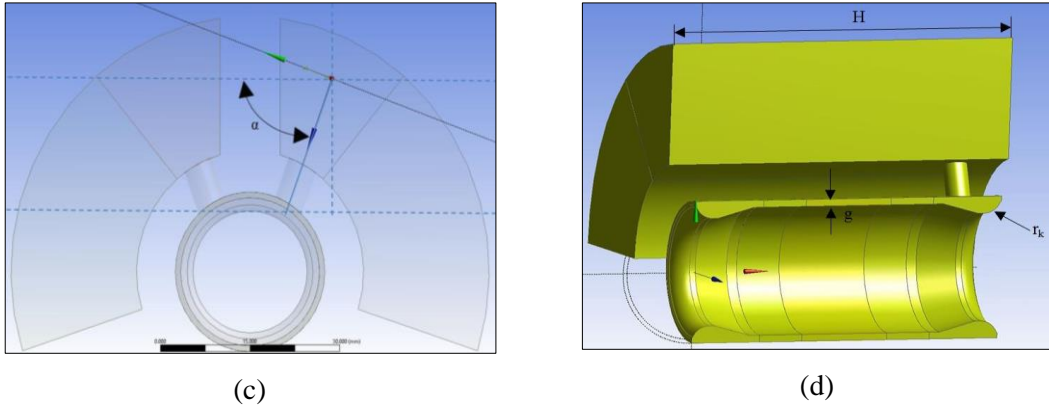
KAD-MR Damperin akış analizi çalışmaları ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 7'de akış hacmi üzerinde, KAD-MR Damperin tasarımındaki geometrik büyüklükler, ANSYS DesignModeller'de parametrik değişkenler olarak tanımlanmıştır. Parametrik tanımlanan büyüklükler ve tasarım için sınır değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu değerlerden bazıları yapılan ön çalışmalar neticesinde sabit kabul edilmiş, diğerleri için ise bir alt ve üst aralık belirlenerek çözüm aranmıştır.

4. KAD-MR DAMPERİN HAD ANALİZİ (CFD ANALYSIS OF LAR-MR DAMPER)



Şekil 6. Optimize edilen geometrideki manyetik akı yoğunluğu değerleri (Magnetic flux density values in the optimized geometry)





Şekil 7. Parametrik tanımlanan geometrik büyüklüklerin konumları (a-d) (Locations of geometric quantities defined parametrically)

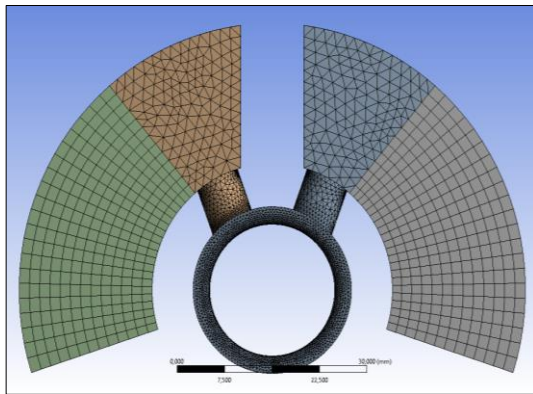
Parametrik tanımlanan büyüklükler ve tasarım için sınır değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu değerlerden bazıları yapılan ön çalışmalar neticesinde sabit kabul edilmiş, diğerleri için ise bir alt ve üst aralık belirlenerek çözüm aranmıştır.

4.1. Çözüm Ağı (Solution Networks)

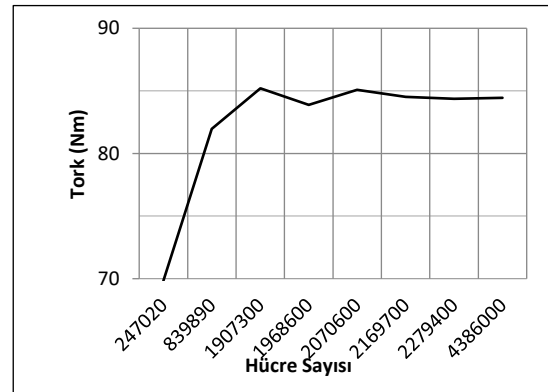
KAD-MR damperin çözüm ağında; zamana bağlı ve deforme olan bir analiz yapılacağı için değişken hacimli geometriye sahip akış bölgelerinde sweep (kare prizma) elemanlar, sabit hacim olarak kalacak olan hacimlerde ise düzgün dörtyüzlü (üçgen piramit) elemanlar kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan çözüm ağı yapısı Şekil 8'de gösterilmiştir. Çözüm ağı yapısı, doğru analiz sonuçları elde etmede etkilidir [23]. Bu amaçla çözüm ağı sayısı arttıkça, belirli bir değerden sonra analiz sonuçları değişmiyorsa ağ bağımsızlığı elde edilmiş olur. Ağ

bağımsızlığının elde edilmesi için analizler yapılmış ve yaklaşık olarak 2000000 hücre sayısından sonra tork değerinin sabit kaldığı Şekil 9'da görülmektedir. Hesaplama yapılacak olan akış geometrisinin boyutlarına göre değişmek üzere, hesaplama bölgesinde yaklaşık olarak 1352000 düğüm ve 2120000 adet hacim elemanına ayrılmıştır.

HAD analizinde de çözüm ağı çözümünün doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple oluşturulan çözüm ağının kalitesini tanımlayan çeşitli ölçütler bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın dikkate alınan "aspect ratio" ve "skewness" değerleridir. Bu değerler ANSYS programında MESH modülünde de hesaplanarak verilmektedir. Literatür incelendiğinde "aspect ratio" değerinin 10'un altında, "skewness" değerinin ise 0.8 üzerinde olması çözüm için kabul edilebilir değer olarak tanımlanmaktadır [24].



Şekil 8. HAD analizi için çözüm ağı (Solution mesh for CFD analysis)



Şekil 9. Ağ bağımsızlığının grafiksel gösterimi (Graphical representation of mesh independence)

Mesh Metric	Aspect Ratio
Min	1.011
Max	33.341
Average	4.7491
Standard Deviation	2.326

Mesh Metric	Skewness
Min	7.9143e-005
Max	0.8647
Average	0.14599
Standard Deviation	0.14113

(a)

(b)

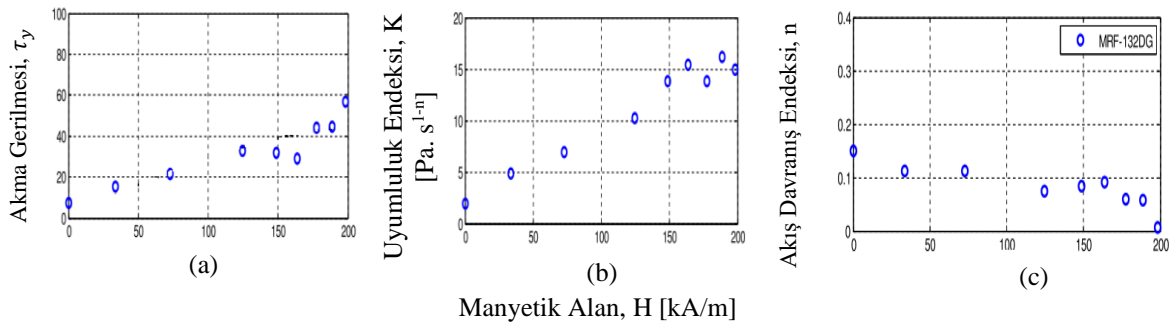
Şekil 10. Mesh Metric değerleri a) Aspect ratio b) Skewness (Mesh Metric values a) Aspect ratio b) Skewness)

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli (Computational Fluid Dynamics Model)

MR sıvılar manyetik alan uygulandığında Newton tipi olmayan davranış gösterirken, manyetik alan ile uyarılmadığında Newton tipi akışkan davranışı gösterirler. Newton tipi olmayan akışkan davranışını tanımlamak için en yaygın kullanılan modeller Bingham plastik modeli ve Herschel-Bulkley modelleridir. Bu çalışmada, MR sıvının akma sonrası bölgesinde lineer olmayan davranışlarını doğru şekilde tanımlanmak için Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Herschel-Bulkley modeli;

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(B) + K(\dot{\gamma})^n & |\tau| > \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| < \tau_y \end{aligned} \quad (2)$$

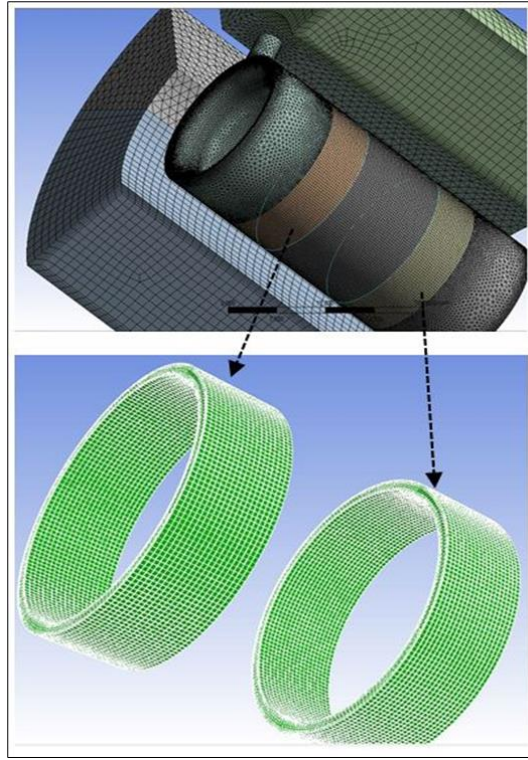
olarak ifade edilmektedir. Denklemden τ kayma gerilmesini, $\dot{\gamma}$ kayma hızını, $\tau_y(B)$ manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak oluşan dinamik akma gerilmesini, K uyumluluk endeksi, n ise akış davranış endeksi olarak ifade edilmektedir. MRF-132DG sıvısına ait τ_y , K ve n değerleri Becnel'in çalışmasında [23] manyetik alan şiddetine bağlı olarak Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. MRF-132DG'ye ait Herschel-Bulkley model parametrelerinin manyetik alana bağlı değerleri (Magnetic field dependent values of Herschel-Bulkley model parameters of MRF-132DG)

KAD-MR damperin akış analizi, hareketli çözüm ağı (dinamik ağ, deforme olan ağ) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli çözüm ağı, yüzeylerin hareketi ile ağın yeniden düzenlenmesi esasına dayanır. Dinamik ağ modeli ancak zaman bağlı analizler ile

çalıştırılabildiğinden, hesaplama süresi uzundur ve yüksek boyutta veri ortaya çıkmaktadır. MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı, böylece akışkanın viskozitenin değiştiği, halka biçimli kanal (Şekil 12) içerisinde, akma gerilmesi sebebiyle nispeten düşük hızlı akışı neticesinde $Re < 2300$ olduğu için laminer akış olarak modellenmiştir.



Şekil 12. KAD-MR Damperde manyetik etkinin oluştuğu hacimsel bölgeler (Volumetric regions where magnetic effect occurs in LAR-MR Damper)

5. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

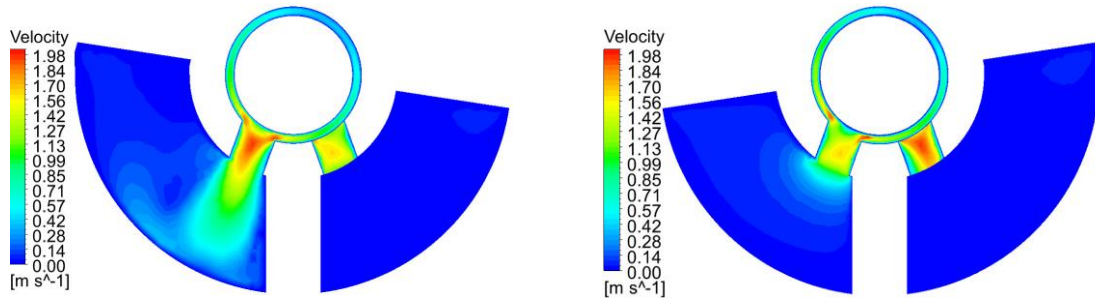
Tablo 3’de verilen parametre sınır ve sabit değerleri için MOGA kullanılarak, manyetik alan etkisi ile kontrol edilebilir tork değerinin (T_B), viskoz etkiler nedeniyle oluşan kontrol edilemeyen tork (T_V) değerine oranı olan dinamik oranın (λ) en yüksek olduğu tasarım, optimum tasarım olarak tespit edilmiştir. Optimum tasarım geometrisi ve elde

edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir. Yapılan optimum tasarıma ait olan akış analizine ait görsel sonuçlardan bazıları Şekil 13-14-15’te gösterilmiştir. Şekil 13’de 8° ’lik bir dönme hareketi sonunda akışkanın bir odacıktan diğerine kanal içinde manyetize edilerek akması durumunda oluşan hız konturları görülmektedir. Akışkanın sıkışmaya maruz kaldığı odacıktan dar kanal içine geçişinde ani yön değişimi nedeniyle hızın yükseldiği, kanal içinden genişleme odacığına geçişte ise ani kesit

genişlemesi nedeniyle akış ayrılması oluştuğu ve merkezde daha yüksek hızlı bir akış meydana geldiği görülmektedir.

Tablo 3. Optimize edilmiş geometrik değerler (Optimised geometric values)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	T_B	T_V	λ
10 mm	80 mm	38 mm	7 mm	8 mm	70°	62 mm	0.55 mm	90.7 N.m	57.4 N.m	1,58

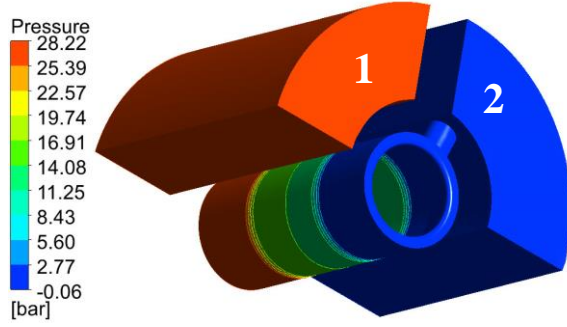


(a)

(b)

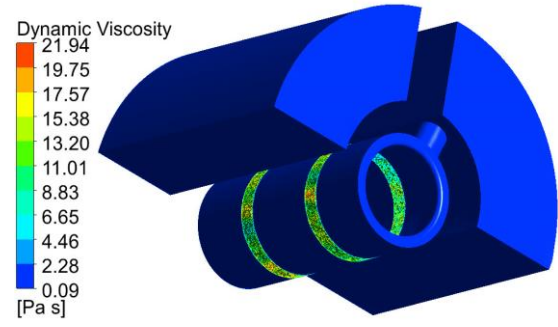
Şekil 13. 8°'lik bir dönme hareketi sonunda (a) ön ve (b) arka kesitlerde hız konturlarının değişimi (Variation of velocity contours in (a) front and (b) rear sections after a rotation of 8°)

Şekil 14'de ise dönme pozisyonundaki basınç konturları görülmektedir. Basınç, sıkışma (1 nolu hacim) odasının da en yüksek ve genişleme (2 nolu hacim) odasının da en düşük değerindedir. Bu esnada



Şekil 14. 8°'lik bir dönme hareketi esnasında oluşan basınç dağılımı (Pressure distribution during a rotational movement of 8°)

kanal boyunca basıncın bu iki değer arasında değiştiği görülmektedir. Özellikle akışkanın Şekil 15'te gösterilen manyetik alana maruz kaldığı bölümlerde MR etki ile çok şiddetli basınç değişimlerine maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 15. Dinamik viskozitenin manyetik alan etkisi ile değişimi (Variation of dynamic viscosity with magnetic field effect)

Tasarım parametrelerinin her birinin sönüm torkuna etkisini belirleyebilmek için Tablo 5'de verilen parametrelere uygun analizler 5 kademeye ayrılarak yapılmıştır. Her bir parametrenin tork ile olan ilişkisi ayrı ayrı grafikler üzerinde çizdirilerek incelenmiştir. Bu parametrelere göre yapılan analizler sonucu elde edilen veriler performans durumlarına göre incelenmiştir.

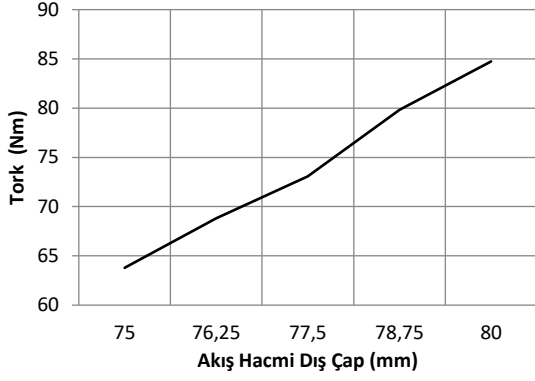
Bu çalışmada hedef tork değeri hedef değer olduğundan, parametrelerin tork değeri üzerinde ne kadar etkisi olduğu kıyaslanmıştır. Bu kapsamda Konik yarıçapı (r_k) %3, Kanat kalınlığı delik açısı (α) %3,7, delik merkezinin yatay merkezdeki

konumu (h_1) %3,8 ve kanat dairesi çapının (D_2) tork değişimine etkisi sadece %5 çıktığından bu parametrelerin etkisinin çok az olduğu değerlendirilmiştir.

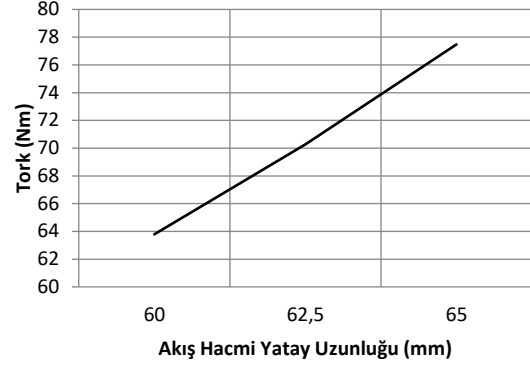
Akış hacmi dış çapı (D_1) tork oluşumunda %17,7'lik etki göstermiştir. Akış hacmi dış çapı büyüdükçe daha büyük moment elde edildiğinden, doğru orantılı değişen tork değeri görülmüştür (Şekil 16). Akış hacmi yatay uzunluğu (H) büyüdüğünde kanadın süpüreceği hacim artmakta ve daha büyük viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Bu veriye bağlı olarak yatay uzunluğu ile tork değeri %19,3'lük etkisi ile doğru orantılı bir değişim belirlenmiştir (Şekil 17).

Tablo 4. HAD analizi için tanımlanan parametreler (Parameters defined for CFD analysis)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
6-10	80	38	7	8	70	60	0,55	2
10	75-80	38	7	8	70	60	0,55	2
10	80	38-40	7	8	70	60	0,55	2
10	80	38	5-7	8	70	60	0,55	2
10	80	38	7	7-9	70	60	0,55	2
10	80	38	7	8	65-75	60	0,55	2
10	80	38	7	8	70	60-65	0,55	2
10	80	38	7	8	70	60	0,55-1	2
10	80	38	7	8	70	60	0,55	1-2



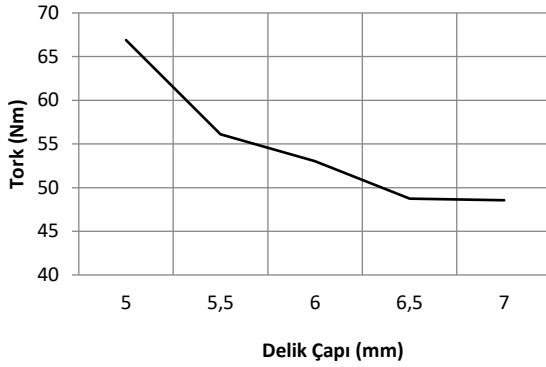
Şekil 16. Akış hacmi dış çapı-tork ilişkisi (Flow volume outer diameter-torque relationship)



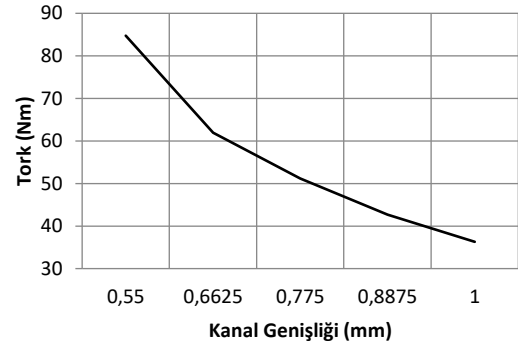
Şekil 17. Akış hacmi yatay uzunluğu-tork ilişkisi (Flow volume horizontal length-torque relationship)

Akışı etkileyen delik çapı (D_3) ile tork arasında beklendiği gibi %27,4 gibi yüksek ters orantılı bir ilişki vardır. Delik çapı büyüdükçe, daha az sürtünme kuvveti ve viskoz kuvvetler oluşmaktadır (Şekil 18). Kanal genişliği (g) %56,8 ile manyetik alan analizinde olduğu gibi en büyük

etkiye sahiptir. Kanal genişliği arttıkça, dairesel kanalda MR sıvı daha rahat hareket edebilmekte daha az sürtünme kuvveti ve viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Manyetik alan etkisinin tersine, sıvı akışının oluşturduğu basınç düşümünde kanal genişliği ile tork arasında ters orantılı bir ilişki vardır (Şekil 19).



Şekil 18. Kanat dairesi-tork ilişkisi (Wing circle torque relationship)



Şekil 19. Kanal genişliği-tork ilişkisi (Groove width-torque relationship)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yarı aktif bir sönümlenme elemanı olarak Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper geliştirilmiştir. Akma gerilmesinin kestirimi için ANSYS-Magnetostatic yazılımı kullanılmış ve üç boyutlu analiz yapılmıştır. KAD-MR Damperde MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge, ANSYS DesignModeller'de çizilerek kritik büyüklükler parametrik olarak tanımlanmıştır. ANSYS RSO programıyla, hedef değer olan maksimum manyetik akı yoğunluğunu en düşük akımda sağlayacak parametrik büyüklükler belirlenmiştir. Optimizasyon algoritması olarak MOGA (Çok Amaçlı Genetik Algoritma) kullanılmıştır. Manyetik alan analizinde belirlenen geometrik boyutlar dahilinde KAD-MR Damper içerisindeki akışın hesaplamalı akışkanlar

dinamiği simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak akış hacmi ANSYS DesignModeller'de oluşturulmuştur. Kanat kalınlığı, akış hacmi dış çapı, kanat dairesi çapı, delik çapı, delik merkezinin dışarıya olan uzaklığı, delik açısı, akış hacmi yatay uzunluğu, kanal genişliği, konik yarıçapı parametre olarak tanımlanmıştır.

Manyetik alan analizinde MR sıvı üzerinde 0,6 T manyetik akı değeri üretecek tasarım gerçekleştirilmiştir. Bunun için kanal genişliğinin çapta 1,1 mm, aktif kanat uzunluğu ise toplamda 8 mm hesaplanmıştır. Manyetik alanı üretmek için 0,5 mm emaye kaplı bobin telinden 160 tur sarılarak istenen manyetik alan, bobine 1,7A akım uygulanarak elde edilmesi hesaplanmıştır. Manyetik alan etkisi ile sağlanan dinamik oran

değeri 1,58 olarak hesaplanmıştır. Newtoniyen olmayan akış bölgesi analizinde de en etkili parametrenin %56,8 gibi bir oranda beklendiği gibi kanal genişliği olduğu belirlenmiştir. İkinci önemli parametre ise kanala giriş çıkışın sağlandığı delik çapının etkisi %27,4 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar genel olarak ele alındığında istenen tork değerinin verilen kısıtlar dahilinde elde edilebildiği göstermektedir.

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)

Hakan DOĞAN: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and wrote the manuscript.

İsmail ŞAHİN: Deney ve sonuçların kontrolü ve değerlendirilmesi ve makalenin genel kontrolünü gerçekleştirmiştir.

He carried out the control and evaluation of experiments and results and the overall control of the manuscript.

Zekeriya PARLAK: Manyetik alan ve Akış analizlerin kontrolü ve yorumlanmasını gerçekleştirmiştir.

He performed the control and interpretation of magnetic field and flow analyses.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. El-Kafafy, S.M. El-Demerdash, A.-A.M. Rabeih, Automotive Ride Comfort Control Using MR Fluid Damper, *Engineering*. 04 (2012) 179–187. doi:10.4236/eng.2012.44024.
- [2] Q.H. Nguyen, N.D. Nguyen, S.B. Choi, Optimal design and performance evaluation

of a flow-mode MR damper for front-loaded washing machines, *Asia Pacific Journal on Computational Engineering*. 1 (2014). doi:10.1186/2196-1166-1-3.

- [3] J.-H. Kim, J.-H. Oh, Development of an above knee prosthesis using MR damper and leg simulator, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 4 (2001) 3686–3691. doi:10.1109/ROBOT.2001.933191.
- [4] İ. Şahin, Z. Parlak, C. Güneri, Araç Koltuk Süspansiyon Sistemleri İçin Çift Borulu Manyeto-Reolojik Amortisör Tasarımı ve Sayısal Analizleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 7 (2019) 331–343. doi:10.29109/gujsc.514507.
- [5] G. Sozeri, A. Yılmaz, I. Şahin, Analysis and Comparison of Current Dependent Models of MR (Magnetoreological) Dampers Used in Knee Prosthesis, içinde: 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, 2019: ss. 1–4. doi:10.1109/SIU.2019.8806306.
- [6] J. Huang, J.. Zhang, Y. Yang, Y.. Wei, Analysis and design of a cylindrical magnetorheological fluid brake, *Journal of Materials Processing Technology*. 129 (2002) 559–562. doi:10.1016/S0924-0136(02)00634-9.
- [7] H.T. Guo, W.H. Liao, A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid, *Smart Materials and Structures*. 21 (2012). doi:10.1088/0964-1726/21/6/065012.
- [8] X. Lian, H. Deng, G. Han, M. Ma, X. Zhong, Y. Gao, R. Hu, Self-adapting model for variable stiffness magnetorheological dampers, *Smart Materials and Structures*. 31 (2022) 025006. doi:10.1088/1361-665X/ac3f79.
- [9] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, P. Citti, Design And Testing Of A MRF Rotational Damper For Vehicle Applications, *Smart Materials and Structures*. 19 (2010) 65006. doi:Artn 065006 Doi 10.1088/0964-1726/19/6/065006.
- [10] F. Imaduddin, S.A. Mazlan, H. Zamzuri, A design and modelling review of rotary magnetorheological damper, *Materials and Design*. 51 (2013) 575–591. doi:10.1016/j.matdes.2013.04.042.

- [11] A. Farjoud, N. Vahdati, Yap Fook Fah, Mathematical Model of Drum-type MR Brakes using Herschel-Bulkley Shear Model, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 19 (2008) 565–572. doi:10.1177/1045389X07077851.
- [12] N.M. Wereley, J.U. Cho, Y.T. Choi, S.B. Choi, Magnetorheological dampers in shear mode, *Smart Materials and Structures*. 17 (2008). doi:10.1088/0964-1726/17/01/015022.
- [13] K. Karakoc, E.J. Park, A. Suleman, Design considerations for an automotive magnetorheological brake, *Mechatronics*. 18 (2008) 434–447. doi:10.1016/j.mechatronics.2008.02.003.
- [14] D. Quamar, C. Sarkar, Optimal Design of Hydraulic Disc Brake for Magnetorheological (MR) Application, *Defence Science Journal*. 72 (2022) 783–792. doi:10.14429/dsj.72.18369.
- [15] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, P. Citti, Design And Testing Of A MRF Rotational Damper For Vehicle Applications, *Smart Materials and Structures*. 19 (2010) 065006. doi:Artn 065006 Doi 10.1088/0964-1726/19/6/065006.
- [16] L. Yang, S.Z. Chen, B. Zhang, Z.Z. Feng, A Rotary Magnetorheological Damper For A Tracked Vehicle, *Advanced Materials Research*. 328–330 (2011) 1135–1138. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.1135.
- [17] J.Q. Zhang, Z.Z. Feng, Q. Jing, Optimization Analysis Of A New Vane MRF Damper, *Journal of Physics: Conference Series*. 149 (2009) 12087. doi:10.1088/1742-6596/149/1/012087.
- [18] L. Deng, S. Sun, M. Christie, D. Ning, S. Jin, H. Du, S. Zhang, W. Li, Investigation of a seat suspension installed with compact variable stiffness and damping rotary magnetorheological dampers, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 171 (2022) 108802. doi:10.1016/j.ymssp.2022.108802.
- [19] R.S.T. Saini, S. Chandramohan, S. Sujatha, H. Kumar, Design of bypass rotary vane magnetorheological damper for prosthetic knee application, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 32 (2021) 931–942. doi:10.1177/1045389X20942577.
- [20] TechnicalData, MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid, Lord product selector guide: lord magnetorheological fluids. (2019). https://lordfulfillment.com/pdf/44/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf.
- [21] David Meeker, Finite Element Method Magnetics, (2023). <https://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- [22] Z. Parlak, Manyeto-Reolojik Sıvılı Yarı Aktif Bir Sönümleyici Tasarımı ve Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [23] A.C. Becnel, High Strength Semi-Active Energy Absorbers Using Shear And Mixed Mode Operation At High Shear Rates, Maryland University, Aerospace Engineering, 2014.
- [24] ANSYS Inc., ANSYS Fluent Meshing User 's Guide, ANSYS, 2015.

An analytical model for single-diode equivalent circuit parameter extraction of PV Modules/Cells

Ulaş EMİNOĞLU^{1*}  Bilge Kaan ATAY² 

¹Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Samsun, Turkey

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Tokat, Turkey

Article Info:

Research article
Received: 18/01/2023
Revision: 16/04/2023
Accepted: 27/04/2023

Keywords

Curve fitting
Mathematical model
PV Modul/Cell
Parameter extraction

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2023
Düzeltilme: 16/04/2023
Kabul: 27/04/2023

Anahtar Kelimeler

Eğri uydurma
Matematiksel model
PV Modülü/Hücre,si,
Parametre kestirimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada PV modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin analitik bir model önerilmektedir. / This study propose an analytical model for determining single-diode circuit parameters for PV modules.

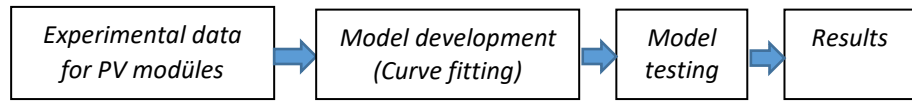


Figure A: Graphic summary of the model development. / Şekil A: model geliştirmeye ilişkin grafiksel özet

Highlights (Önemli noktalar)

- Yapılan analizler, model ile elde edilen eşdeğer devre parametrelerinin ve sonucunda oluşturulan I-V ve P-V karakteristiklerinin deneysel veriler ile çok büyük oranda örtüştüğünü göstermektedir. / The analyzes show that the equivalent circuit parameters obtained with the model and the I-V and P-V characteristics formed as a result of the model overlap to a great extent with the experimental data.
- Model diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, daha az deneysel verilere ihtiyaç duyma özelliğine sahiptir. / The model has the feature of being easy to use in parameter estimation and less need for experimental data compared to other methods.
- Ayrıca model tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantaja sahiptir. / In addition, the model has the advantage of being able to determine all parameters.

Aim (Amaç): The aim of this study is to develop a new analytical method for the determination of single-diode equivalent circuit parameters for PV Modules, which is easy to apply and requires few experimental data. / Bu çalışmanın amacı PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin kolay uygulanabilir, az sayıda deneysel veri gerektiren yeni bir analitik yöntem geliştirmektir.

Originality (Özgünlük): In model development, mathematical relationships developed between short-circuit current (I_{sc}) and photon current (I_{pv}) values for many PV modules available in the literature. / Model geliştirmede literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri kullanılarak akımlar arasında bir matematiksel bağıntı kullanılmaktadır.

Results (Bulgular): Equivalent circuit parameters were determined for PV Modules, and it was seen that the results matched exactly with the results of similar analytical methods given in the literature, so the model was reliable. / PV Modüller için sonuçların literatürde verilen benzer analitik yöntemlerin sonuçları ile birebir örtüştüğü dolayısıyla modelin güvenilir olduğu görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): It is possible to say that the model has advantages such as ease of use in parameter estimation, less need for experimental data and being able to determine all parameters compared to other methods. / Modelin diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, deneysel verilere daha az ihtiyaç duyma ve tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantajları olduğunu söylemek mümkündür.



An analytical model for single-diode equivalent circuit parameter extraction of PV Modules/Cells

Ulaş EMİNOĞLU^{1*} Bilge Kaan ATAY²

¹Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Samsun, Turkey

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Tokat, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/01/2023
Revision: 16/04/2023
Accepted: 27/04/2023

Keywords

Curve fitting
Mathematical model
PV Modul/Cell
Parameter extraction

Abstract

This study proposes an analytical model for determining single-diode circuit parameters for PV modules. In the study, firstly, a mathematical relation is established using the curve fitting method between the photon current (I_{pv}) and short-circuit current (I_{sc}) for several PV modules available in the literature. Then, an analytical model consisting of a set of equations with three unknowns (R_p , R_s and a) is developed using this developed relation between the currents. Analysis showed that the parameters extracted by using proposed model and resulting I-V and P-V curves largely overlap with the real data. Therefore, Root Mean Square Error (RMSE) and Coefficient of Determination (R^2) values between calculated and real data are found to be negligible. In addition, compared to other methods, it can be stated that the model has advantages such as ease of use in parameter estimation, less need for experimental data, and ability to determine all the parameters.

PV Modüller/Hücrelerin Tek-Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Kestirimi İçin Yeni Bir Analitik Model

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2023
Düzelme: 16/04/2023
Kabul: 27/04/2023

Anahtar Kelimeler

Eğri uydurma
Matematiksel model
PV Modülü/Hücre,si,
Parametre kestirimi

Öz

Bu çalışmada PV modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin analitik bir model önerilmektedir. Çalışmada ilk olarak literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile akımlar arasında bir matematiksel bağıntı oluşturulmuştur. Daha sonra, akımlar arasında geliştirilen bu bağıntı eşdeğer devre denklemlerinde kullanılarak 3 bilinmeyenli (R_p , R_s ve a) denklem sisteminden oluşan analitik model geliştirilmiştir. Yapılan analizler, model ile elde edilen eşdeğer devre parametrelerinin ve sonucunda oluşturulan I-V ve P-V karakteristiklerinin deneysel veriler ile çok büyük oranda örtüşüğünü göstermektedir. Bu nedenle hesaplanan ve gerçek veriler arasındaki Hatanın Ortalama Karekökü (RMSE) ve Belirleme Katsayısı (R^2) değerleri ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur. Ayrıca modelin diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, deneysel verilere daha az ihtiyaç duyma ve tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantajları olduğunu söylemek mümkündür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin gelişimi sonucunda PV hücrelerin üretim maliyetlerinin düşmesi, PV modüllerin bağımsız enerji üretim sistemlerinde ya da şebekelerde daha çok tercih edilen enerji kaynakları haline gelmiş olup PV modüllerinin doğru şekilde modellenmesi, etkin değerlendirme açısından önemli bir rol oynamaktadır [1]. Bunun

yanı sıra, eşdeğer devre parametrelerine dayanan sistemin çıkış akımı ve güç eğrileri, tasarım ve boyutlandırma açısından büyük önem taşımaktadır [2]. Eşdeğer parametrenin belirlenmesinde tek-diyot beş parametre model ve iki-diyot yedi parametre model üzere iki tip eşdeğer devre modeli literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin referans [3]'de bir PV hücresi deneysel veriler kullanılarak hem tek-diyot beş parametre

model hem de iki-diyot yedi parametre model ile ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki model için de çeşitli yöntemlerin uygulanabileceği analitik ve sayısal çözümler bulunmaktadır [4]. İki ticari PV modülün kullanıldığı çalışmada tek-diyot beş parametre eşdeğer devre modeli parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilen farklı yöntemler karşılaştırılmıştır. Standart Test Koşullarını (STC) ve sıcaklığa bağlı doyma akımı dikkate alınarak eşdeğer devreye ait paralel ve seri direnç modeli [5]'de verilmiştir. Fakat kullanılan denklemlerin doğrusal olmayışı ve bilinmeyen değişkenlerin sayısının fazla oluşu bu tür sistemler için analitik çözüm üretmeyi kullanışlı kılmamaktadır. Bu nedenle tek-diyot beş parametreliliğe ait parametreleri analitik olarak belirlemek için yeni bir yaklaşım [6]'da verilmiştir. Oluşturulan modele ilişkin denklem seti Newton-Raphson yöntemi kullanılarak bilinmeyen parametrelerin bu yöntemle kolayca belirlenebileceği gösterilmiştir. Çalışmasına Lambert W fonksiyonunu dahil eden Patel ve arkadaşları [7], analitik yöntemler ile sayısal yöntemleri sentezleyerek ortaya koyduğu yeni bir metod ile işlem süresini kısaltmıştır. Referans [8]'de, eşdeğer devre parametresinin belirlenmesinde çözüm için Gauss-Seidel yöntemi kullanılmış ve Gauss-Seidel yöntemi başlangıç koşullarından önemli ölçüde etkilendiğinden başlangıç değerleri analitik yaklaşımlarla belirlenmiştir. Benzer şekilde eşdeğer devre kullanılarak üç denklemden oluşan analitik bir yöntem referans [9]'da geliştirilmiş olup bir çok PV modül için literatürde verilen analitik yöntemler ile sonuçlar kıyaslanarak modelin geçerliliği test edilmiştir. Bu çalışmaların dışında tek-diyot model için parametrelerden birinin sabit kabul edildiği farklı denklem setleri de oluşturulmuştur. Örneğin eşdeğer devre modelinin ana parametrelerinden biri olan paralel direnç giriş parametresi alınarak diğer parametreler bu değere bağlı olarak belirlenmiştir [10]. Benzer şekilde, eşdeğer devreyi temel alan analitik bir model [11]'de verilmiş ve bilinen iki ticari PV modül için elde edilen sonuçlar literatürde mevcut sonuçlar ile karşılaştırarak test edilmiştir. Fakat bu modelde diyot idealite faktörü (a) giriş parametresi olarak alınmakta ve değeri 1-1,5 arasında tutulmuştur.

Bu modellerin yanı sıra değişkenlerin ortam sıcaklığına bağlı olarak modellenmesi de mümkündür. Ancak sıcaklığa bağlı modelde üretici firmanın vermiş olduğu ölçüm sonuçları ile güneş ısı önemli bir etken haline gelmekte ve analizleri zorlaştırmaktadır [12]. Literatürde yaygın olarak kullanılan tek diyotlu beş parametreliliğe ait model ve iki diyotlu yedi parametreliliğe ait model arasındaki temel fark, parametre sayılarındaki farklılıklar ve

parametrelerin hesaplanan değerlerinin ne derece doğruya yakın olduğuyla ilgilidir. Her iki ana modelin karşılaştırmalı bir incelemesi referans [13]'de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada modeller arasındaki farklılıklar, doğruluk ve işlem süreleri açısından analiz edilmiş ve buna göre iki-diyot yedi parametre modelinin daha iyi bir doğruluğa sahip olduğu ancak hesaplamalarda daha uzun bir işlem süresine gerek duyduğu sonucuna varılmıştır. Benzer bir şekilde Yahfdhou ve arkadaşları [14], yaptıkları çalışmada her iki modeli de bir sayısal çözüm yöntemi ile çözerek bir PV hücre için hibrit sistemde benzetim çalışması yapmışlardır. Analizler sonucunda tek-diyot modelinin daha az parametreye sahip olması nedeniyle bilinmeyenlerin daha kısa sürede hesaplanabileceğini, ancak iki-diyot modelinin doğruluk açısından daha tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Nümerik çalışmalarda başlangıç değerlerinin saptanması zor olduğundan, iki-diyot modelinin başlangıç değerlerini belirlemek amacıyla yaklaşık analitik çözümler [15]'de verilerek farklı ticari PV hücrelerinin deneysel verileri ile geçerlilikleri test edilmiştir. Oluşturulan matematiksel modelde bazı küçük değerli terimler ve bilinmeyen parametre sayısını azaltmak için denklem setinde diyot doyma akımı ihmal edilmiştir. Referans [16]'da PV eşdeğer devresinden doğrusal olmayan beş temel denklem oluşturulmuş ve bu denklemler MATLAB platformuna ait bir çözüm tekniğiyle ticari bir PV modülü için çözülmüştür. Modelin güvenilirliği deneysel bir sistem için onaylanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde iki farklı yöntem sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çok parametreliliğe ait karmaşık sistemlerde optimum çözüm elde etmek için meta-sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde PV modüllerin eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için bu tip optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [17-23, 27-29]. Genetik Algoritma [24] kullanılarak tek-diyot devre modeline ait bilinmeyen parametreler referans [17]'de hesaplanmış ve bu meta-sezgisel yöntemin problem için çok elverişli olduğu sonucuna varılmıştır. Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) [25] yönteminin ilk olarak bu problem için uygulandığı çalışmada [18] PV modül için deneysel ölçüm verileri kullanılarak çift-diyot eşdeğer devre modeli parametreleri belirlenmiştir. Aynı optimizasyon metodu benzer bir yaklaşım ile tek-diyot devre modeli [19], tek-diyot ve çift-diyot devre modelleri [20] için parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Her iki çalışmada da elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve

literatürde yer alan sonuçlar ile kıyaslanarak geçerlilikleri test edilmiştir. Diferansiyel Gelişim Algoritması [26] olarak adlandırılan başka bir optimizasyon tekniği ise tek-diyot model parametrelerinin kestirimi için uygulanmıştır [21]. Geliştirilen model deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak sonuçların geçerliliği test edilmiştir. Meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinin geliştirilmiş versiyonları kullanılarak PV modüllerin parametre kestirimi için Ref. [22]'de Memetik Uyarlanabilir Diferansiyel Gelişim (Memetic Adaptive Differential Evolution) tekniği kullanılmıştır. Çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan PV modüller için çift-diyot devre modeline ait eşdeğer devre parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar ile elde edilen V-I karakteristik eğrisi deneysel ölçüm sonuçlar ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği gösterilmiştir. Bunların yanısıra, Referans [23]'de tek-diyot ve çift-diyot eşdeğer devre modeli yerine üç-diyot devre modeli kullanılmıştır. PV Modüller için eşdeğer devre parametreleri ve sonucunda V-I karakteristikleri belirlenerek modelin geçerliliği deneysel veriler kullanılarak test edilmiştir. Eşdeğer devre modeline ait parametrelerin belirlenmesinde Çekirge Optimizasyon Algoritması (Grasshopper Optimization Algorithm) kullanılmış ve deneysel veriler ile devre parametrelerine göre hesaplanan V-I karakteristiği değerleri kullanılarak belirlenen Kök Ortalama Karekök Hatası (Root Mean-Square Error; RMSE) değeri hedef fonksiyon olarak kullanılmıştır. Tekli optimizasyon temelli algoritmaların yanı sıra çoklu optimizasyon tabanlı yöntemler kullanılarak parametre tahmini çalışmaları da literatürde mevcuttur. Referans [27]'de yapılan çalışmada tek-diyot devre modeli parametrelerini belirlemek için hibrit GA-PSO temelli bir algoritma kullanılmıştır. Analiz sonucunda hibrid yaklaşımın GA temelli yöntemle göre daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Referans [28]'de PV modül parametre kestirimi için Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network) kullanılmış ve performansı bir analitik yöntem ile karşılaştırılmıştır. Parametre ve sonucunda maksimum güç kestirimi için YSA temelli modelin daha uygun sonuçlar verdiği görülmesine rağmen YSA temelli modelin hesaplama süresi ve uygulanabilirlik açısından daha elverişsiz olduğu sonucuna varılmıştır. PV modüller için iki-diyot eşdeğer devre parametrelerinin çıkarılması için Nelder-Mead ve modifiye PSO algoritmasının kombinasyonuna dayanan bir karma yöntem referans [29]'da uygulanmıştır. Geliştirilen algoritma bilinen ticari PV modül için uygulanarak sonuçlar meta-sezgisel metotlar ile elde edilen

sonuçlar ile kıyaslanmış ve modelin geçerliliği test edilmiştir.

Meta-sezgisel metotların kullanımının yanı sıra arama-temelli algoritmalar kullanılarak PV Modüller için parametre kestiriminin yapıldığı çalışmalarda literatürde mevcuttur [30-34]. Tek-diyot eşdeğer devre modelinde seri dirence indirgenmiş (R_s) denklemi diyot idealite faktörünün 1-2 değer aralığı için araştırılarak eşitliğin sağlandığı parametre değerleri ve bunlara bağlı olarak diğer eşdeğer devre parametrelerin değerlerinin belirlendiği algoritma [30]'da verilmiştir. Denklemlerin eşdeğer devre paralel direnç (R_p) parametresine indirgenerek benzer bir parametre kestiriminin yapıldığı çalışma [31]'de verilmiştir. Yapılan çalışmada alınan her bir diyot idealite faktörü (a) değeri için belirlenen maksimum güç değeri ile gerçek güç değeri arasında tanımlanan hata dikkate alınarak algoritma sonlandırılmaktadır. Referans [32]'de verilen çalışmada, hesaplanacak parametrelerin sayısı ikiye indirgenerek arama algoritmasına dayanan grafik yöntemi ile parametre kestirimi gerçekleştirilmiştir. Referans [33]'de tek-diyot eşdeğer devre modelinin parametrelerinin belirlenmesi için diyot idealite faktörünün (a) bağımsız bir değişken olarak tanımlandığı kısmi-arama temelli bir algoritma geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemde, kalan parametrelerin değerleri, sadece seri dirence (R_s) indirgenmiş bir denklemin sayısal çözümü kullanılarak her adımda analitik olarak elde edilmektedir. Algoritma, hesaplanan çıkış akımı ve I-V eğrisinin deneysel verileri arasında tanımlanan hata değerine dayanarak sonlandırılmaktadır. İki-diyot eşdeğer devre modeli için de benzer bir yaklaşım referans [34]'de verilmiştir. Önerilen algoritmada seri direnç (R_s) bağımsız bir parametre olarak kullanılmış ve geri kalan parametreler her bir iterasyonda seçilen seri dirence göre hesaplanmaktadır. Algoritmada seçilen seri direncin değeri ile hesaplanan değeri örtüşünceye kadar işlemler tekrarlanmaktadır. Benzer şekilde Referans [35]'de eşdeğer devre seri direncine (R_s) göre gerçek çözümün arandığı arama temelli algoritma verilmiştir. Algoritmada tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin değeri maksimum güç noktası baz alınarak aranmaktadır. Çalışmada bir çok PV modül için deneysel çıkış akımı ve çıkış gücü verileri kullanılarak modelin geçerlilik analiz yapılmıştır. Referans [36]'de ise PV hücresinin seri direnci doğrusal olmayan direnç olarak iki çift kutuplu transistör ile modellenerek çıkış gerilimi çıkış akımının bir fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır. Oluşturulan model kullanılarak STC koşullarında sistem

parametrelerinin spesifik değerleri için PV hücresi ve modülünün akım-gerilim ve güç-gerilim değişimi analiz edilmiştir.

Bu çalışmada PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin yeni bir analitik yöntem önerilmektedir. Modelin matematiksel olarak geliştirilmesi ve çözüm denklemleri Bölüm 2’de verilmektedir. Bölüm 3’de modelin geçerlilik analizi verilmektedir. Analizler iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak elde edilen sonuçların benzer diğer analitik yöntemler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapılarak modelin avantajları sunulmaktadır. İkinci olarak değişik sıcaklıklarda farklı tip PV Modüller için arama-temelli ve meta-sezgisel metotlar uygulanarak elde edilmiş parametreler kullanılarak oluşturulan akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri dikkate alınarak modelin geçerlilik analizi yapılmaktadır. Deneysel veriler ve etiket değerleri kullanılarak hesaplanan RMSE ve R² indisleri karşılaştırma amacıyla kullanılmaktadır. Son olarak Bölüm 4’de sonuçlar verilmektedir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1 Pv Modüller/Hücreler İçin Parametre Kestirim Modeli (Parameter Estimation Model For PV Cells/Modules)

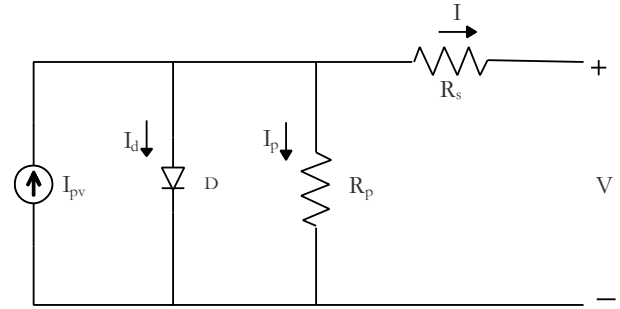
Şekil 1’de bir PV hücresi için yaygın olarak kullanılan tek-diyot eşdeğer devre modeli verilmiştir [2]. Burada I_{pv}; hücrenin ürettiği foton akımı, R_s ve R_p sırasıyla seri ve paralel direnci göstermektedir. Eşdeğer devrede diyot akımı (I_d);

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{aV_t}} - 1 \right) \quad (1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada I_o; diyot sızıntı akımı, a; diyot idealite faktörü ve V_d; diyot uç gerilimini göstermektedir. V_t; diyot üzerindeki termal gerilimi ifade etmektedir (V_t = kN_sT/q). PV modül için seri bağlı hücre sayısı N_s ile gösterilmektedir. 1,38x10⁻²³ J/K değerindeki Boltzmann sabiti k ile, elektron yükü (1,6x10⁻¹⁹ C) ise q ile gösterilmektedir. Son terim olan T ise Kelvin cinsinden hücre sıcaklığıdır [2]

Eşdeğer devrede paralel direnç (R_p) değerinin çok büyük ve diyot akımı (I_d) değerinin çok küçük olması nedeniyle kısa devre durumunda çıkış akımı (I=I_{sc}) değeri foton akımı (I_{pv}) değerine çok yakındır. Çalışmada bu durum matematiksel olarak ilişkilendirilmiştir. İlk olarak çok sayıda PV Modül için literatürde elde edilen foton akımı ve bu PV modüller için kısa devre akımı değerleri saptanmış

ve Şekil 2’de “literatür verisi” olarak verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere bu iki akım değerleri arasında I_{pv}=c₁I_{sc}+c₂ şeklinde lineer bir bağıntı tanımlamak mümkündür. Model katsayıları eğri uydurma metodu olan ve literatürde geniş olarak kullanılan Gauss-Newton [37] metodu ile c₁=0.9998926816 ve c₂=0.0017895792 olarak belirlenmiştir. Oluşturulan model kullanılarak PV’ler için hesaplanan foton akımı Şekil 2’de ayrıca verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere oluşturulan model sonuçları literatür sonuçları ile tamamen örtüşmektedir. Matematiksel olarak, mevcut 141 adet örnek data ve model ile hesaplanan akımlar arasında tanımlanan Kök Ortalama Karekök Hatası [37] değeri RMSE=0.0018 olarak belirlenmiş olup bu değer ihmal edilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla oluşturulan modelin herhangi bir PV Modül için verilen kısa devre akımı kullanılarak üretilen PV akımının analitik olarak kolaylıkla belirlenmesine olanak sağladığını söylemek mümkündür.



Şekil 1. PV Modül/Hücre için tek-diyot eşdeğer devre şeması (Single-diode equivalent circuit diagram for PV Module/Cell)

Diğer taraftan, Şekil 1’de verilen eşdeğer devrede çıkış akımının ifadesi Kirchoff Akım Yasası kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (2)$$

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3)$$

Kısa devre durumunda (I_{sc}, 0);

$$I_{sc} = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (4)$$

Açık devre durumunda (0, V_{oc});

$$0 = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (5)$$

Maksimum güç noktasında (I_{mpp}, V_{mpp});

$$I_{mpp} = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{R_p} \quad (6)$$

Bu noktada gücün gerilime göre türevi;

$$\frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad (7)$$

$$0 = I_{mpp} + \frac{dI}{dV} V_{mpp} \quad (8)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (9)$$

Denklem 3’de verilen eşitliğin gerilime göre türevi alındığında;

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_o}{aV_t} \left(1 + R_S \frac{dI}{dV}\right) e^{\frac{V+I R_S}{aV_t}} - \frac{1}{R_p} \left(1 + R_S \frac{dI}{dV}\right) \quad (10)$$

Denklem 9, elde edilen son denklemde yerine konulduğunda maksimum güç noktasında çıkış akımının çıkış gerilimine oranı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{I_o}{aV_t} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t}} + \frac{1}{R_p} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) \quad (11)$$

Denklem 5’den faydalanılarak I_o akımı;

$$I_o = \frac{\frac{V_{oc}}{R_p} - I_{pv}}{\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}}} \quad (12)$$

Elde edilen bu ifade Denklem 4, 6 ve 11’de yerine konulduğunda dört bilinmeyen içeren üç denklem (Denklem 13-15) elde edilmektedir.

$$I_{sc} = I_{pv} - \frac{(I_{pv}R_p - V_{oc}) \left(e^{\frac{I_{sc}R_S}{aV_t} - 1} \right)}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} \right) R_p} - \frac{I_{sc}R_S}{R_p} \quad (13)$$

$$I_{mpp} = I_{pv} - \frac{(I_{pv}R_p - V_{oc}) \left(e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t} - 1} \right)}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} \right) R_p} - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{R_p} \quad (14)$$

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{I_{pv}R_p - V_{oc}}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} \right) R_p aV_t} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t}} + \frac{1}{R_p} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) \quad (15)$$

Eğri uydurma ile oluşturulan model kullanılarak foton akımı (I_{pv}) ifadesi elde edilen son denklemlerde yerine konulduğunda üç bilinmeyenli denklem seti (Denklem 16-18) aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)(D-1)R_p + V_{oc}}{DR_p} E - I_{sc} \left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right) = 0 \quad (16)$$

$$\left[\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)R_p(D-1) + V_{oc}}{D} F - V_{mpp} - I_{mpp}R_S \right] \frac{1}{R_p} - I_{mpp} = 0 \quad (17)$$

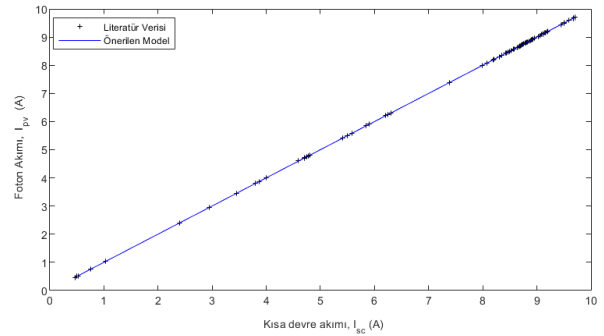
$$\left[\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)R_p - V_{oc}}{aV_t DR_p} (F + 1) + \frac{1}{R_p} \right] \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = 0 \quad (18)$$

Burada, $D = e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1$, $E = e^{\frac{I_{sc}R_S}{aV_t}} - 1$ and $F = \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t} - 1$. Oluşturulan bu denklem seti bir PV Modül için verilen test koşullarında R_s , R_p ve a parametrelerinin analitik olarak belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Kalan iki parametre ise Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak I_o akımı;

$$I_o = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc}R_S}{R_p}}{\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} - \frac{I_{sc}R_S}{aV_t}} \quad (19)$$

ve Denklem 5 yeniden düzenlenerek photon akımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$I_{pv} = I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (20)$$



Şekil 2. Farklı tip/boyuttaki PV Modüller için foton akımının kısa devre akımı ile değişimi (Variation of photon current with short-circuit current for different type/size PV Modules)

2.2 Model Doğrulama (Model Verification)

Geliştirilen modele ilişkin denklemlerin çözümünde Newton-Raphson metodu [37] kullanılmış olup hesaplamalar Matlab ortamında [38] yapılmıştır. Tablo 1-3’de önerilen model kullanılarak sırasıyla SW255, KC200GT ve MSX120 PV modüller için standart test koşullarında ($T=25$ oC ve $g=1000$ W/m²) elde edilen tek-diyot eşdeğer devre parametreleri verilmektedir. Literatürde yer alan bazı analitik metotlar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla ayrıca verilmektedir. Tablo 1’den görüleceği üzere SW255 PV modül için belirlenen eşdeğer devre parametreleri Referans [10]’da verilen parametreler ile tam olarak uyuşmamaktadır. Bu, paralel direncin (R_p) deneysel ölçümler ile belirlenerek Referans [10]’da giriş parametresi olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Geliştirilen model ile elde

edilen $R_p=2245 \Omega$ değeri ref. [10]'da verilen modelde giriş parametresi olarak kullanılması sonucunda elde edilen parametre değerleri Tablo 1'de son satırda verilmiş olup geliştirilen model sonuçları ile tamamen örtüştüğü görülmektedir. Tablo 2'de KC200GT PV Modül için elde edilen eşdeğer devre parametreleri Referans [11]'de belirlenen parametre değerleri ile birlikte verilmiştir. Her iki analitik yöntem ile elde edilen sonuçların farklılık göstermesi nedeninin referans [11]'de diyot idealite faktörünün (a) bilinen bir parametre olarak kabul edilmesi ve giriş verisi olarak kullanılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Geliştirilen model ile elde edilen sonuçlardan $a=1.376$ değeri Referans [11]'de verilen modelde giriş parametresi olarak kullanılması sonucunda belirlenen parametre değerleri Tablo 2'de son sütunda verilmiştir. Bu durumda her iki metot ile elde edilen sonuçların bire bir örtüştüğü açıkça görülmektedir. Tablo 3'de BP-MSX120 PV modül için elde edilen eşdeğer devre parametreleri verilmektedir. Bu PV modül için Referans [2]'de hesaplanan parametre değerleri ve Referans [8-9, 16]'da önerilen analitik yöntemler uygulanarak elde edilen parametre

değerleri karşılaştırma amacıyla ayrıca verilmiştir. Tablo 3'den görüleceği üzere belirlenen parametre değerleri ile diğer modeller [8-9, 16] kullanılarak elde edilen parametre değerleri ve Ref. [2]'de verilen sonuçlar tamamen uyusmaktadır. Fakat bu modeller geliştirilen model ile uygulama açısından kıyaslandığında bazı dezavantajlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin referans [2]'de verilen sonuçlar kendi modeline ait denklemlerde yerine konduğunda eşitliklerin sağlanmadığı görülmüştür. Dolayısıyla modele ilişkin denklemlerin hatalı verildiğini söylemek mümkündür. Referans [16]'da verilen modelin parametrelerin başlangıç değerlerine çok bağımlı olduğu görülmüş olup çözüme çok yakın olmayan başlangıç koşullarında gerçekçi sonuç elde etmek için fonksiyonel yazılım programı gerektirmektedir. Her ne kadar Referans [8, 9]'da verilen modeller kullanılarak aynı sonuçlar elde ediliyor olsa da bu metotlar eşdeğer devreye ait beş temel denklemin indirgenmesi esasına dayanmaktadır. Dolayısıyla önerilen model ile kıyaslandığında daha kompleks denklem sisteminin çözümünü gerektirmektedirler.

Tablo 1. SW255 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for SW255)

PV Modül	SW255 PV Modül [10]											
	Parametreler	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (nA)	I_{pv} (A)
Ref. [10]		38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.203	6300	1.264	0.304	8.8800
Önerilen Model		38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.211	2245	1.244	21.66	8.8808
Model [10]		38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.211	2245	1.244	21.66	8.8808

Tablo 2. KC200GT için hesaplanan parametre değerleri (Calculated parameter values for the KC200GT)

PV Modül	KC200GT PV Modül [11]											
	Parametreler	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μ A)	I_{pv} (A)
Ref. [11]		32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.231	594.8	1.300	0.096	8.213
Önerilen Model		32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.206	1862	1.376	0.265	8.2110
Model [11]		32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.206	1855	1.376	0.264	8.2109

Tablo 3. BP-MSX120 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for BP-MSX120)

PV Modül	BP-MSX120 PV Modül [2]											
	Parametreler	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μ A)	I_{pv} (A)
Ref. [2]		42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.473	1365	1.396	0.323	3.871
Önerilen Model		42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.475	1339	1.395	0.322	3.871

Tablo 3 Devamı

Model [8]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1365	1.396	0.322	3.871
Model [9]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1365	1.398	0.322	3.871
Model [16]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1360	1.398	0.325	3.871

3. BULGULAR (RESULTS)

I-V karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiş MSX60, STP6-120/36 ve PWP201 PV modüller için geliştirilen modelin geçerliliği analiz edilmiştir. Analizlerde iki farklı hata indisi; RMSE ve R^2 [37] kullanılmıştır. Tablo 4’de MSX60 PV Modül için $T=25$ °C geliştirilen model kullanılarak elde edilen parametre değerleri Referans [19]’da meta-sezgisel metotlardan PSO algoritması uygulanarak hesaplanan parametre değerleriyle birlikte verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere her iki metot ile elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın değerlidir. Belirlenen bu parametre değerleri kullanılarak oluşturulan I-V karakteristikleri deneysel veriler ile birlikte Şekil 3’te verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere önerilen model sonuçları ile oluşturulan akım-gerilim karakteristiği meta-sezgisel metot sonuçlarıyla oluşturulan eğriye nazaran deneysel veriler ile daha yüksek oranda örtüşmektedir. Bu durum Tablo 7’de verilen hata indisleri değerlerinden daha açık görülmektedir. Tablo 7’de birinci sütunda MSX60 PV modül çıkış akımı değerleri için hata oranları verilmiştir. Önerilen model sonuçları kullanılarak oluşturulan çıkış akımları için RMSE ve R^2 değerleri sırasıyla 0.0384 ve 0.9989 olup bu değerler ideal (sırasıyla 0 ve 1) değerlerine çok yakındır. Dolayısıyla PSO temelli algoritma sonuçları [19] ile belirlenen çıkış akımı değerlerine nazaran deneysel veriler ile daha çok uyduğunu söylemek mümkündür.

STP6-120/36 PV modül için eşdeğer devre parametreleri belirlenerek Ref. [30]’da verilen sonuçlar ile birlikte Tablo 5’te verilmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak oluşturulan I-V karakteristiği deneysel sonuçlar ve referans [30]’da verilen çıkış akımı değerleriyle birlikte Şekil 4’de verilmiştir. Tablo 5’ten görüleceği üzere belirlenen parametre değerleri referans [30]’da diyot idealite faktörüne bağlı olarak oluşturulan arama-temelli algoritma

ile elde edilen sonuçlar ile farklılık göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 4’den faydalanarak önerilen model sonuçları ile oluşturulan akım-gerilim karakteristiğinin deneysel veriler ve ayrıca ref. [30]’da verilen akım değerleri ile büyük oranda uyduğu görülmektedir. Bu aynı zamanda Tablo 7’de ilgili PV modül için hesaplanan ve ikinci satırda verilen RMSE, R^2 hata değerlerinden de görülmektedir. Her ne kadar referans [30]’da verilen çıkış akımlarına ilişkin hata değerleri çok küçük oranda daha elverişli olsa da verilen eşdeğer devre parametre değerleri kullanıldığında aynı akım değerlerinin elde edilemediği görülmüştür. Bu durum, belirlenen $R_p=9.745$ Ω değerinin $V_{oc}=19.21$ V gerilim seviyesi için ısı kayıplar açısından elverişli bir değer olmamasından da görülebilmektedir. Tablo 6’da geliştirilen model kullanılarak PWP201 PV Modül için 45 °C de elde edilen eşdeğer devre parametreleri verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla Referans [20]’de PSO metodu kullanılarak belirlenen çift-diyot eşdeğer devre parametreleri ayrıca verilmektedir. Her iki metot ile elde edilen parametre değerlerinin yakın değerli olduğu görülmektedir. Belirlenen parametre değerleri kullanılarak oluşturulan I-V karakteristikleri deneysel ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 5’de verilmiştir. Önerilen yöntem sonuçlarıyla elde edilen akım-gerilim karakteristiği deneysel veriler ve çift-diyot eşdeğer devre sonuçlarına ilişkin akım değerleriyle örtüşmektedir. Bu durum deneysel veriler kullanılarak hesaplanan ve Tablo 7’de üçüncü satırda verilen RMSE ve R^2 hata değerlerinden de açıkça görülmektedir. Her iki model sonuçlarına ilişkin hata değerleri çıkış eğrisi uyumunun yüksek oranda olduğunu göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen model sonuçlarına ilişkin çıkış akımı değerlerinin çift-diyot eşdeğer devre akım değerlerine nazaran küçük oranda da olsa daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 4. MSX60 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for MSX60)

PV Modül	MSX60 PV Modül [19]										
	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [19]	21.1	3.8	17.1	3.5	36	60	0.146	561.6	1.331	0.15	3.802
Önerilen Model	21.1	3.8	17.1	3.5	36	60	0.186	512.7	1.369	0.214	3.801

Tablo 5. STP6-120/36 için hesaplanan parametre değerleri (Calculated parameter values for STP6-120/36)

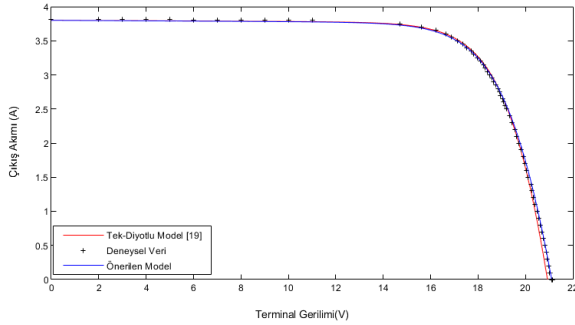
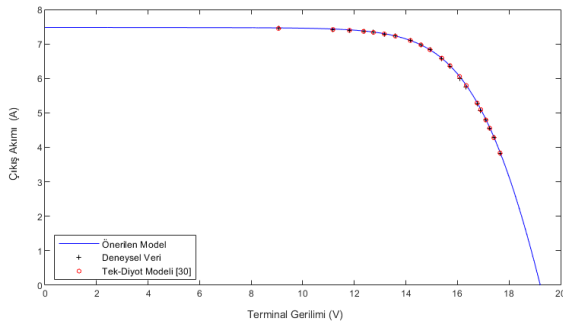
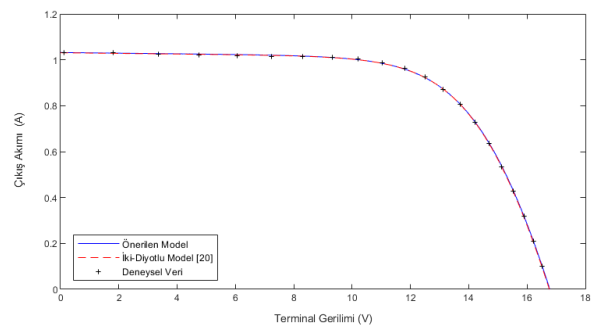
PV Modül	STP6-120/36 PV Modül [30]											
	Parametreler	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [30]		19.21	7.48	14.93	6.83	36	120	0.0049	9.745	1.207	1.20	7.483
Önerilen Model		19.21	7.48	14.93	6.83	36	120	0.1605	1222	1.272	2.66	7.481

Tablo 6. PWP201 için 45 °C de hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for PWP201 at 45 °C)

PV Modül	Photowat-PWP201 PV Modül [20]										
	Parametre	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [20]		16.7785	1.0317	12.649	0.912	36	1.2392	744.71	1.3173/ 1.3169	2.5129/ 1×10^{-6}	1.0323
Önerilen Model		16.7785	1.0317	12.649	0.912	36	1.2072	744.07	1.3441	3.2171	1.0333

Tablo 7. Farklı PV Modüller için gerçek çıkış akımı ile hesaplanan akımlar arasındaki RMSE ve R^2 hata indisleri değeri (RMSE and R^2 error indices value between actual output current and calculated currents for different PV Modules)

Model/ PV Modül	Önerilen Model		Model Ref [19]		Model Ref [30]		Model Ref [20]	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
MSX60	0.0384	0.9989	0.0913	0.9941	-	-	-	-
STP6-120/36	0.0241	0.9995	-	-	0.0178	0.9997	-	-
PWP201	0.0024	0.9999	-	-	-	-	0.0033	0.9998

**Şekil 3.** Solarex MSX60 için elde edilen I-V karakteristiği (Obtained I-V characteristic for Solarex MSX60)**Şekil 4.** STP6-120/36 için 55 °C de I-V karakteristiği (I-V characteristic at 55 °C for STP6-120/36)**Şekil 5.** PWP201 için 45 °C de I-V karakteristiği (I-V characteristic for PWP201 at 45 °C)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerini belirlemek amacıyla analitik bir yöntem önerilmiştir. Model, literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri eğri uydurma yöntemi ile matematiksel bir bağıntıya dönüştürülerek geliştirilmiştir. Açık-devre, kısa-devre ve maksimum güç testlerine ilişkin akım ve gerilim verilerini kullanarak eşdeğer devreye ait tüm parametrelerin kolaylıkla belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Modelin geçerliliği farklı güç ve ayrıca farklı sıcaklık değerlerinde PV Modüller için test edilmiştir. İlk olarak farklı tip

(SW255, KC200GT and MSX120) PV Modüller için standart test koşullarında eşdeğer devre parametreleri belirlenmiş, sonuçların literatürde verilen benzer analitik yöntemlerin sonuçları ile birebir örtüştüğü dolayısıyla modelin güvenilir olduğu görülmüştür. Her ne kadar uygulama/kullanım açısından analitik yöntemler ile kıyaslandığında daha elverişsiz olsa da arama ve meta-sezgisel algoritma temelli metotların güvenilirliğinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle önerilen metot ile elde edilen sonuçlar ve literatürde bu tip yöntemler ile elde edilen sonuçlar kullanılarak oluşturulan I-V ve P-V eğrileri için geçerlilik analizi ayrıca yapılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak hesaplanan RMSE ve R² hata değerleri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Geliştirilen model sonuçlarına ilişkin eğrilerin deneysel veriler ile çok yüksek oranda örtüştüğü ve çıkış akımı hata değerlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Buna ilaveten, modelin arama-temelli metotlara nazaran genelde daha geçerli veya çok yakın değerli sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer taraftan bu tip metotlar ile kıyaslandığında modelin kullanım/uygulama açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Keskin V, Khalejan SHPR, Çıkla R. Investigation of the Shading Effect on the Performance of a grid-connected PV Plant in Samsun/Turkey. *Politeknik Dergisi*. 2021; 24(2): 553-563.
- [2] Hejri M, Mokhtari H, Azizian MR, Söder L. An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules. *International Journal of Sustainable Energy*. 2016; 35(4): 396-410.
- [3] Chan DSH, Phang JCH. Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and

- double-diode model parameters from IV characteristics. *IEEE Trans. on Electron Devices*. 1987; 34(2): 286-293.
- [4] Shongwe S, Hanif M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015; 5(3): 938-946.
- [5] Sera D, Teodorescu R, Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. *IEEE international symposium on industrial electronics*. 2007; 2392-2396.
- [6] Reis LRD, Camacho JR, Novacki DF. The Newton Raphson method in the extraction of parameters of PV modules. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. 2017; 1(15): 634-639.
- [7] Patel S. The single diode model of IV and PV characteristics using the lambert w function. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*. 2016; 5(5): 7034-7039.
- [8] Kareem MSA, Saravanan M. A new method for accurate estimation of PV module parameters and extraction of maximum power point under varying environmental conditions. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2016; 24(4): 2028-2041.
- [9] Atay BK, Eminoğlu U. A new approach for parameter estimation of the single-diode model for photovoltaic cells/modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2019; 27(4): 3026-3039.
- [10] Chaibi Y, Salhi M, El-Jouni A, Essadki A. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. *Solar Energy*. 2018; 163: 376-386.
- [11] Cubas J, Pindado S, Farrahi A. New method for analytical photovoltaic parameter extraction. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2013; 873-877.
- [12] Farivar G, Asaei B. Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters. *IEEE International Conference on Power and Energy*. 2010; 929-934.
- [13] Shannan NMAA, Yahaya NZ, Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Eng*. 2013; 210-214.
- [14] Yahfdhou A, Mahmoud AK, Youm I. Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2016; 7: 247-260.

- [15] Hejri M, Mokhtari H, Azizian MR, Ghandhari M, Söder L. On the parameter extraction of a five-parameter double-diode model of photovoltaic cells and modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014; 4(3): 915–923.
- [16] Mohapatra A, Nayak B, Mohanty KB. Parameter Extraction of PV Module using NLS Algorithm with Experimental Validation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017; 7(5): 2392.
- [17] Zagrouba M, Sellami A, Bouaïcha M, Ksouri M. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*. 2010; 84(5): 860–866.
- [18] Sandrolini L, Artioli M, Reggiani U. Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis. *Applied Energy*. 2010; 87(2): 442–451.
- [19] Muralidharan R. Parameter extraction of solar photovoltaic cells and modules using current–voltage characteristics. *International Journal of Ambient Energy*. 2017; 38(5): 509–513.
- [20] Nunes HGG, Pompo JAN, Mariano SJPS and Calado MRA. A new high performance method for determining the parameters of PV cells and modules based on guaranteed convergence particle swarm optimization. *Applied Energy*. 2018; 211:774-791.
- [21] Ishaque K, Salam Z. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE). *Solar Energy*. 2011; 85 (9): 2349-2359.
- [22] Li S, Gong W, Yan X, Hu C, Bai D, Wang L. Parameter estimation of photovoltaic models with memetic adaptive differential evolution. *Solar Energy*. 2019; 190: 465–474.
- [23] Elazab OS, Hasanien HM, Alsaidan I, Abdelaziz AY, Muyeen SM. Parameter estimation of three diode photovoltaic model using grasshopper optimization algorithm. *Energies*. 2020; 13(2): 497.
- [24] Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. Boston: Addison Wesley Publishing Company MA, USA.
- [25] Kennedy J, Eberhart RC. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICNN'95)* Perth, WA, Australia. 1995; 1942-1948.
- [26] Storn R, Price K. Differential Evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997; 11(4): 341-35.
- [27] Saravanan C, Panneerselvam MA. A comprehensive analysis for extracting single diode PV model parameters by hybrid GA-PSO algorithm. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 78: 16-19.
- [28] Castro R. Data-driven PV modules modelling: Comparison between equivalent electric circuit and artificial intelligence based models. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018; 30: 230-238.
- [29] Hamid NFA, Rahim NA, Selvaraj J. Solar cell parameters identification using hybrid Nelder-Mead and modified particle swarm optimization. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2016; 8: 1-21.
- [30] Tong NT, Pora W. A parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells. *Applied Energy*. 2016; 176: 104-115.
- [31] Rasool F, Drieberg M, Badruddin N, Singh BSM. PV panel modeling with improved parameter extraction technique. *Solar Energy*. 2017; 152: 519-530.
- [32] Bencherif M, Benouaz T. Parameter extraction of solar panels using the graphical method. *International Journal of Ambient Energy*. 2018; 1-18.
- [33] Hussein A. A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017; 25: 4431-4444.
- [34] Amin YK, Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy*. 2018; 162: 403-409.
- [35] Villalva MG, Gazoli JR, and Filho ER. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. 2009; 24(5): 1198-1208.
- [36] Pelap PB, Dongo PD, Kapim AD, Optimization of the characteristics of the PV cells using nonlinear electronic components. *Energy Technologies and Assessments*. 2016; 16: 84-92.
- [37] Chapra, S.C. and Canale, R.P. (1988). *Numerical Methods for Engineers*. New York: McGraw-Hill.
- [38] Matlab R2010b Enterprise.

Investigation of a Beta Spectrum through Virtual MCA Supported By Virtual Oscilloscope

Gözde TEKTAŞ^{1,2*} , Cüneyt ÇELİKTAŞ² 

¹ Izmir University of Economics, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Izmir, Turkey

² Ege University, Faculty of Science, Department of Physics, Izmir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/10/2022
Revision: 27/12/2022
Accepted: 16/03/2023

Keywords

Virtual MCA
Virtual Oscilloscope
Beta Energy Spectrum
LabVIEW

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/10/2022
Düzeltilme: 27/10/2022
Kabul: 16/03/2023

Anahtar Kelimeler

Sanal MCA
Sanal Osiloskop
Beta Enerji Spektrumu
LabVIEW

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The study aimed to test the performance of a developed virtual MCA (Multichannel Analyzer) in a beta spectrometer. Besides, an oscilloscope feature was brought in to the virtual MCA different from the conventional ones. The results obtained from virtual instruments were compared with those of the real ones. / Bu çalışma, geliştirilen sanal MCA'nın (Çok Kanallı Analizör) performansını bir beta spektrometresinde test etmeyi amaçlamıştır. Ayrıca, gerçek cihazlardan farklı olarak sanal MCA'ya bir osiloskop özelliği getirilmiştir. Sanal cihazlardan elde edilen sonuçlar gerçek cihazlardan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

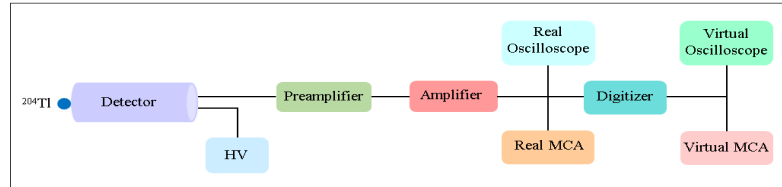


Figure A: Circuit schema used in the experiment (HV: high voltage power supply)

/Şekil A: Deneyde kullanılan devre şeması(HV: yüksek voltaj güç kaynağı)

Highlights (Önemli noktalar)

- Developed virtual MCA was used to accumulate the beta energy spectrum. / Geliştirilen sanal MCA beta enerji spektrumunu elde etmek için kullanılmıştır.
- Virtual oscilloscope was utilized for displaying the signals in beta spectrometer. / Sanal osiloskop beta spektrometresinde sinyalleri görüntülemek için kullanılmıştır.
- The performances of the developed virtual MCA and virtual oscilloscope were tested by comparing them with the real ones. / Geliştirilen sanal MCA ve sanal osiloskobun performansı gerçekleriyle karşılaştırılarak test edilmiştir.

Aim (Amaç): It was aimed to obtain the beta spectrum via the virtual MCA and to display the output signals of a main amplifier in the virtual oscilloscope. / Sanal MCA vasıtasıyla beta spektrumlarının elde edilmesi ve ana yükselticinin çıkış sinyallerinin sanal osiloskopta görüntülenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): A virtual MCA supported by a virtual oscilloscope was developed by writing a code via LabVIEW software functions, and it was used in a beta spectrometer. / LabVIEW yazılım fonksiyonları aracılığıyla kod yazılarak sanal bir osiloskop ile desteklenen bir sanal MCA geliştirilmiştir ve beta spektrometresinde kullanılmıştır.

Results (Bulgular): It was seen that the results from the virtual MCA and virtual oscilloscope were highly compatible with those of the real ones. / Sanal MCA ve sanal osiloskobun elde edilen sonuçların gerçeklerinden elde edilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): It was deduced that the developed virtual MCA and the virtual oscilloscope could be operated in nuclear physics experiments as an alternative option to the real ones. / Geliştirilen sanal MCA ve sanal osiloskobun nükleer fizik deneylerinde gerçeklerine alternatif olarak çalıştırılabileceği sonucuna varılmıştır.



Investigation of a Beta Spectrum through Virtual MCA Supported By Virtual Oscilloscope

Gözde TEKTAŞ^{1,2*} , Cüneyt ÇELİKTAŞ² 

¹ Izmir University of Economics, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Izmir, Turkey

² Ege University, Faculty of Science, Department of Physics, Izmir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/10/2022
Revision: 27/12/2022
Accepted: 16/03/2023

Keywords

Virtual MCA
Virtual Oscilloscope
Beta Energy Spectrum
LabVIEW

Abstract

In this study, the performance of a developed virtual MCA (Multichannel Analyzer) was tested in a beta spectrometer. A real MCA was also used in the spectrometer to compare the results from the virtual one. The beta energy spectrum of a ²⁰⁴Tl radioactive source was displayed in the real and virtual MCAs. Total counts in the spectra from both MCAs were determined for different data acquisition times. In addition to the total counts, spectrum shapes, starting and ending channel numbers of the beta spectrum from the virtual MCA were also compared with those of the real one. Besides, an oscilloscope feature was brought in to the virtual MCA different from the conventional ones. The output signal shapes of a main amplifier through the detector were displayed in a real oscilloscope and the developed virtual oscilloscope to test this feature. It was noticed that results from both MCAs and oscilloscopes were highly compatible with each other. It is concluded that the developed virtual MCA supported by the virtual oscilloscope could be used like a real one.

Sanal Osiloskop İle Desteklenen Sanal MCA Vasıtasıyla Bir Beta Spektrumunun İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/10/2022
Düzeltilme: 27/12/2022
Kabul: 16/03/2023

Anahtar Kelimeler

Sanal MCA
Sanal Osiloskop
Beta Enerji Spektrumu
LabVIEW

Öz

Bu çalışmada, geliştirilen bir sanal MCA'nın (Çok Kanallı Analizör) performansı bir beta spektrometresinde test edilmiştir. Sanal MCA'dan elde edilen sonuçları karşılaştırmak için spektrometrede gerçek bir MCA da kullanılmıştır. ²⁰⁴Tl radyoaktif kaynağının beta enerji spektrumu gerçek ve sanal MCA'da görüntülenmiştir. Her iki MCA'dan farklı veri toplama süreleri için spektrumlardaki toplam sayımlar belirlenmiştir. Toplam sayımların yanı sıra, sanal MCA'dan elde edilen spektrum şekilleri, beta spektrumunun başlangıç ve bitiş kanal numaraları gerçek MCA'dan elde edilenlerle de karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sanal MCA'ya geleneksel olanlardan farklı olarak bir osiloskop özelliği eklenmiştir. Bu özelliği test etmek için bir ana yükselticinin çıkış sinyali gerçek bir osiloskopta ve geliştirilen sanal osiloskopta görüntülenmiştir. Hem MCA'lerden hem de osiloskoplardan elde edilen sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Sanal osiloskop destekli olarak geliştirilen sanal MCA'nın gerçeği gibi kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Measuring the height of each of the pulses and counting the numbers occurring within small voltage ranges are the task for a MCA (Multichannel Analyzer). The resulting list of numbers of counts is spectrum of radiation source

because the height of each pulse is proportional to the amount of energy absorbed in the detector [1]. A MCA device produced by a company was called here as the real MCA. Its screen is shown in Figure 1 as an illustration.

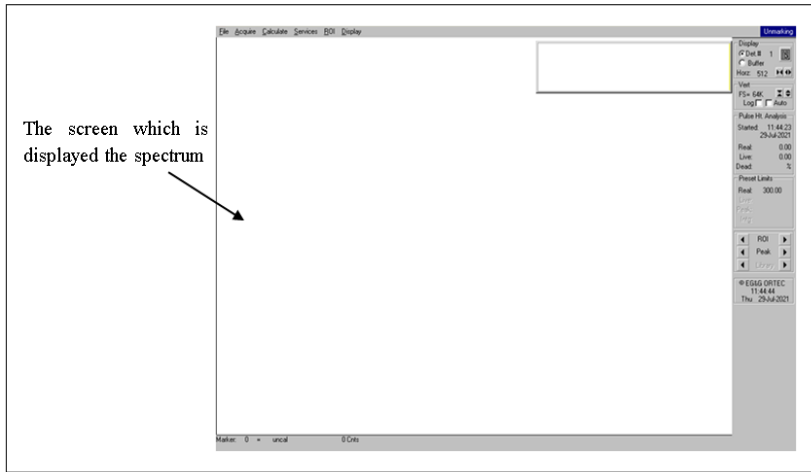


Figure 1. Screen of the real MCA (Gerçek MCA'nın ekranı)

Software applications are developed by programmers in order to increase efficiency and productivity in various situations. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) is a powerful tool that can be used to help achieve these goals [2]. One of the most powerful features that LabVIEW offers engineers and scientists is graphical programming. By using LabVIEW software, the user can design custom virtual instruments by creating a graphical user interface on the computer screen through which one can control selected hardware, analyze acquired data and display results [3].

Virtual MCA is an instrument which can be developed by using LabVIEW software functions. It can be used to display the energy spectrum of a radiation source. It is also possible to add the additional features to the virtual MCA since it is designed by writing the code via the software. In the front panel of the virtual MCA, a screen and an indicator are used to display the spectrum and to show the total counts in the spectrum, respectively.

Oscilloscope is a device used to display the incoming signals from a function generator or a radiation detector. The photograph of the real oscilloscope that utilized here is given in Figure 2 as an illustration.



Figure 2. Photograph of the used real oscilloscope [4] (Kullanılan gerçek osiloskobun fotoğrafı[4])

Virtual oscilloscope is an instrument developed via software in a computer environment. It can be used to display the signals produced by the radiation detectors in nuclear spectrometers.

Spectroscopy is the aspect of radiation measurements that deals with measuring the energy distribution of particles which are emitted by a radioactive source or produced by a nuclear

reaction. A particle energy spectrum is a function that gives the distribution of particles in terms of their energies [5].

A variety of information on detected radiation in the form of electrical signals is provided by detectors. However, the signal must be further processed by an electronic system in order to extract this information [6].

In the literature, Amri et al. presented a new open-source software package for analysis of gamma-ray spectra. The software was created by using Java programming language with the JFreeChart library [7]. A flexible and low-cost digital multichannel analyzer based on FPGA (field-programmable gate array) was developed by Cao, Dinh, Nguyen et al. [8]. Tektas and Celiktas introduced a virtual MCA code for use it in a gamma spectrometer [9]. For Mössbauer spectroscopy, an open source MCA was designed by Giraldo et al. Digilent Chipkit uC32 device compatible with Arduino was used to program the MCA by the authors [10]. Gamma-ray energy spectra were obtained through analogue and digital methods by Ermiş et al. [11].

In the present study, a virtual MCA was developed via LabVIEW software functions in a computer environment. In order to obtain beta energy spectrum, the performance of the virtual MCA was tested, and its spectrum results were compared with those of the real MCA. In addition, the performance of the developed virtual oscilloscope inserted in the virtual MCA was tested in the used beta spectrometer.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The virtual MCA was developed through the software. All processes in the developed virtual MCA, such as determining the amplitude values of the incoming signals, displaying the spectrum, were performed by the software functions. Data were acquired through the driver function (NI-SCOPE) of the used digitizer. Acquired data were sent to

“Peak Detector.vi” function which was used to determine the amplitude values of the signals without the use of a special filtering function. For displaying the spectrum, these values were processed by “General Histogram.vi” function.

In this study, we aimed to acquire the beta energy spectrum in the developed virtual MCA. For this, a solid point ^{204}Tl radioactive source (0.25 μCi) which emits beta radiation was used in the experiment. The particles emitted from the source were detected by a BC-400 type plastic scintillation detector (REXON), and the signals from the detector were transmitted to a preamplifier (ORTEC 113) and an amplifier (ORTEC 485), respectively. The preamplifier is an interface between the detector and the following pulse-processing and analyzing electronics. Pulse shaping and amplitude gain are provided by a linear or main amplifier element in the pulse-processing chain [12]. To proceed the detector signals with the virtual oscilloscope and the virtual MCA, analog signals from the amplifier must be digitized. Therefore, a digitizer (NI USB-5133) was used in the experiment. It has sample rate of 100 MS/s and the 8-bit resolution [13]. The signals from the amplifier can directly be sent to a real oscilloscope (GW Instek GDS-2204) and a real MCA (ORTEC TRUMP 8k) because of the fact that they have own ADCs (Analog-to-Digital Converter). For obtaining the beta spectrum, the output signals of the amplifier were sent directly to the real and virtual MCAs through the digitizer. To display the signal shapes in the virtual and real oscilloscopes, similarly, the devices were fed in the same way. Used block diagram in this study is illustrated in Figure 3.

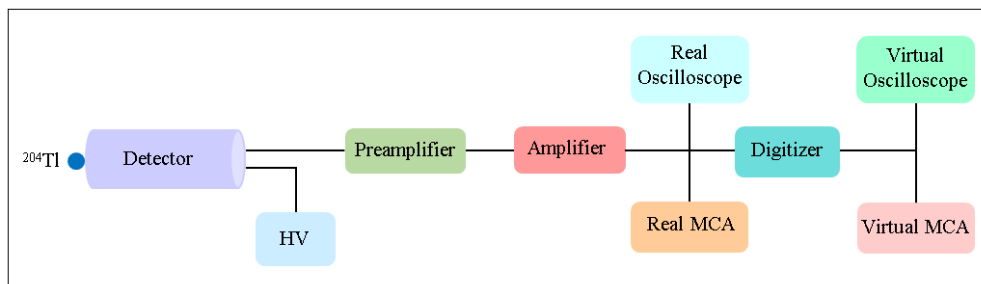


Figure 3. Circuit schema used in the experiment (HV: high voltage power supply) (Deneyde kullanılan devre şeması(HV: yüksek voltaj güç kaynağı))

In the experiment, source-to-detector distance was kept as close as possible to the detector surface to detect more particles from the radiation source. The beta spectra were displayed on the screens of both MCAs for the coarse and fine gain values of 32 and 3 of the used amplifier, which they are the optimal

settings for the spectra, respectively. These gain values were kept unchanged during the measurements. The spectra were displayed in the real and virtual MCAs for the data acquisition times of 100, 200 and 300 s. The total counts in the spectra were identified from both MCAs, and the spectrum

shapes were compared with each other. In addition to these, the starting and ending channel numbers (ch. no.) of the energy spectra from both MCAs were determined. Starting channel is the channel number acquired first count in the spectrum, and ending channel is the channel number with first zero count following the starting channel number. An

illustration that shows the starting and ending channel numbers is given in Figure 4. In the figure, red (cursor 0) and yellow (cursor 1) cursors show the starting and ending channel numbers, respectively. These channel numbers are set by user through the cursors.

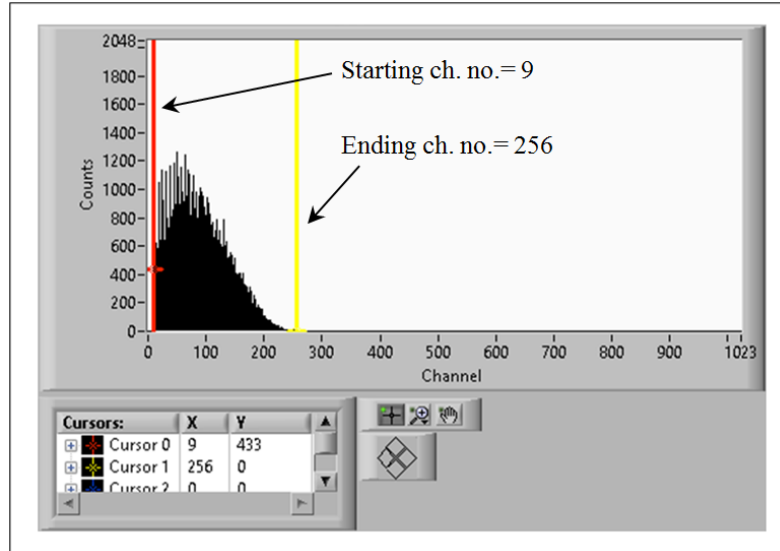


Figure 4. Illustration for starting and ending channel numbers (Başlangıç ve bitiş kanal numaralarını gösteren görsel)

Obtained experimental results are given in the next section.

3. RESULTS (BULGULAR)

The beta spectrum was displayed on the real and virtual MCA screens for the data acquisition times

of 100, 200 and 300 s. As a performance test, the total counts in the spectra were obtained from both MCAs, and these results are given in Table 1. The total counts also include background counts.

Table 1. Total counts in the spectra for the data acquisition times of 100, 200 and 300 s (100, 200, 300 s'lik veri toplama süreleri için spektrumlardaki toplam sayımlar)

Time (s)	Real MCA	Virtual MCA
100	52743	54011
200	105552	102833
300	156554	153058

The beta energy spectra obtained from both MCAs for the acquisition time of 300 s is given in Figure 5. The image in Figure 5 (a) is the original screen

view of the real MCA. In this figure, horizontal and vertical axes display the channel numbers and counts, respectively.

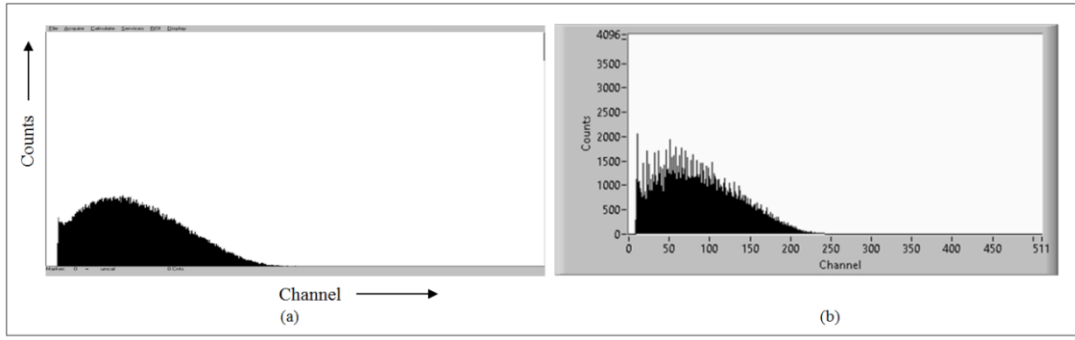


Figure 5. Spectrum shapes displayed in (a) real and (b) virtual MCAs for 300 s (300 s için (a) gerçek ve (b) sanal MCA'larda görüntülenen spektrum şekilleri)

In addition to the spectrum shape, the starting and ending channel numbers (ch. no.) were determined for each acquisition time in both MCAs for the comparison. These channel numbers are given in

Table 2. The rows named ‘Difference’ in this table show the difference between the ending and starting channel numbers.

Table 2. Starting and ending channel numbers (ch. no.) obtained from both MCAs for the different acquisition times (Farklı veri toplama süreleri için her iki MCA'dan elde edilen başlangıç ve bitiş kanal numaraları(ch.no.))

	Time (s)	100	200	300
Real MCA	Starting ch. no.	12	12	12
	Ending ch. no.	248	257	263
	Difference	236	245	251
Virtual MCA	Starting ch. no.	9	9	9
	Ending ch. no.	245	256	273
	Difference	236	247	264

In addition to above, the output signals of the amplifier were displayed in the real and virtual

oscilloscopes. Figure 6 shows the signal shapes displayed in these devices.

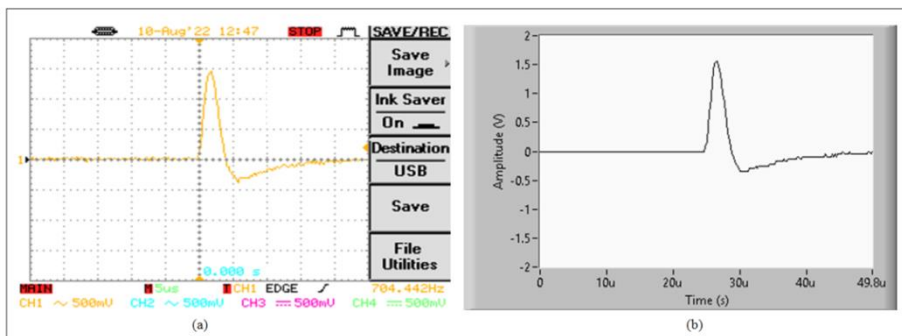


Figure 6. Signal shapes displayed in (a) real oscilloscope and (b) virtual oscilloscope ((a) Gerçek osiloskopta ve (b) sanal osiloskopta görüntülenen sinyal şekilleri)

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

A virtual MCA supported by a virtual oscilloscope was developed by writing a new code via LabVIEW software functions. It was also aimed to obtain the beta spectrum via the virtual MCA and to display the output signals of the amplifier from the detector in the virtual oscilloscope.

Radioactivity is a random event, i.e. the number of ionizing particle emitted by a radioactive substance per unit time is variable. For this reason, the number of counts in each channel of a MCA is different even if pulse amplitudes are the same in each measurement (i.e. the number of counts in the channels changes with each measurement). Since this is due to the radioactive decay, this situation is the same for the real MCA, too. Therefore, measurements were taken once for each data acquisition time. Besides, in order to test whether the total counts in the spectra obtained from both MCAs were compatible with each other, measurements were performed at three different data acquisition times. It was observed that these times were sufficient to display the beta spectra. When the data acquisition time is increased, the number of counts increases naturally, and this was observed in the experiment. As can be seen in the Table 1, the total counts obtained from both MCAs increased with the time increment. It was discerned that these counts from the virtual MCA were highly compatible with those of the real one. Since the operational principles of the real MCA are confidential business information, a detailed comment on the comparison about the counts could not be offered.

Beta particles have a continuous energy spectrum i.e. counts are recorded in each channel between starting and ending channel numbers [5]. This could be seen from the spectra from both MCAs (Figure 5). Besides, when the spectrum shapes displayed in the real and virtual MCAs were compared, it was noticed that they were compatible with each other. The reason of the little visual differences between the spectrum shapes is because the signal amplitudes were determined by the software function in the virtual MCA.

It was also investigated whether the starting and ending channel numbers determined from both MCAs were compatible with each other. It was realized from Table 2 that the existence of some

differences between these channel numbers is due to the determination of the signal amplitudes through the software function in the virtual MCA again, as mentioned above.

By means of the equipped with oscilloscope feature of the virtual MCA, the amplifier signals through the digitizer are displayed on the virtual oscilloscope screen in addition to its multi-channeling feature. If you would like to track the signals together with the multi-channeling, however, you should use another real oscilloscope device apart from the real MCA. In this case, the virtual MCA has an advantage to the real ones because it does not need additional oscilloscope. Moreover, it can be deduced from the acquired signal evaluations that the developed virtual oscilloscope was operated likewise the real one (Figure 6). This result showed that the virtual oscilloscope could be used to display and determine the signal characteristics in place of the real oscilloscope.

The horizontal and vertical axis values and legends on the screens in the virtual MCA and the virtual oscilloscope are automatically given. The axis legends can be named by user (Figures 5 (b) and 6(b)) as well. These properties are another advantage of the virtual one in comparison to the real one.

A virtual MCA was developed for the gamma energy spectrum acquisition in ref. [9]. Differently from that study, it was examined here whether the beta energy spectrum with a completely different structure from the gamma energy spectrum could be obtained by the developed virtual MCA (i.e. while the beta energy spectrum has a continuous energy distribution as mentioned above, the gamma energy spectrum has a discrete structure, gamma photons emit at certain energies). Besides, in the virtual MCA introduced here, sample rate and number of sample required to obtain the data by the digitizer and “width”, “threshold” and “peaks/valleys” inputs of “Peak Detector.vi” function could be set by the user via the controls in the front panel to acquire more compatible spectrum with the real one in different experimental studies (such as using different spectrometers or radioactive sources with different activity). It was concluded from the presented study that the developed virtual MCA could be used to obtain not only the gamma but only the beta spectra in educational and research studies.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

A virtual MCA and a virtual oscilloscope were developed to acquire the spectra and display the signal shapes; and they were tested in a beta spectrometer. It was concluded from the experimental results that the developed virtual MCA could be used to accumulate the beta energy spectrum successfully. It was also observed that the virtual oscilloscope could be utilized for displaying the signals in nuclear spectrometers. It was deduced that the developed virtual MCA and the virtual oscilloscope could be operated in nuclear physics experiments as an alternative option to the real ones. In addition to this, the possibility of the additional features to the virtual MCA such as virtual oscilloscope brought about its advantage compared to the real one.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

This work was supported by Scientific Research Foundation of Ege University under project No. 14 FEN 052.

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)

Gözde TEKTAŞ: She wrote the code by using LabVIEW software functions for virtual instruments, conducted the experiment and performed the writing process.

Sanal cihazlar için LabVIEW yazılım fonksiyonlarını kullanarak kod yazmış, deneyi yapmış ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Cüneyt ÇELİKTAŞ: He contributed to the code development for virtual instruments, conducted the experiment and performed the writing process.

Sanal cihazlar için kodun geliştirilmesine katkıda bulunmuş, deneyi yapmış 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] Gilmore G., (2008). Practical Gamma-ray Spectrometry. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Bitter R., Mohiuddin T. and Nawrocki M., (2007). LabVIEW Advanced Programming Techniques. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Sumathi S. and Surekha P., (2007). LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems, Berlin: Springer-Verlag.
- [4] GW Instek, GDS-2204 Digital Oscilloscope, <https://www.gwinstek.com/en-global/products/detail/GDS-2000>, Accessed: 08/10/2022
- [5] Tsoulfanidis N., (1995). Measurement and Detection of Radiation, London: Taylor & Francis.
- [6] Leo W. R., (1987). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Berlin: Springer-Verlag.
- [7] Amri L. El et al., New open-source software for gamma-ray spectra analysis, Applied Radiation and Isotopes, 185 (2022) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110227>
- [8] Cao V. H., Dinh T. H., Nguyen T. T. et al., Flexible and low-cost FPGA-based multichannel analyzer for handheld measurement devices, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 1018 (2021) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165808>
- [9] Tektas G., Celiktas C., Design of a virtual MCA and its use in radiation spectrometer, Instruments and Experimental Techniques, 65 (2022) 804-810. doi: 10.1134/S0020441222050232
- [10] Giraldo E. et al., Open source multichannel analyzer and remote monitor for Mössbauer spectroscopy, Hyperfine Interactions, 241 (2020) 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10751-020-01717-z>
- [11] Ermiş E. E. et al., Analogue and digital analysis of the effects of some parameters in determination of the best experimental energy resolution, Turkish Journal of Physics, 38 (2014) 203-213. doi:10.3906/fiz-1401-10

- [12] Knoll G. F., (2000). Radiation Detection and Measurement, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [13] National Instruments, USB-5133 Oscilloscope Device, <https://www.ni.com/en-tr/support/model.usb-5133.html>, Accessed: 08/10/2022

Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Vermicular Graphite Cast Iron by Using Thermal Analysis

Merve Ulular¹  Veysel Durak¹  Cem Uluç¹  Hasan Hasırcı^{2*} 

¹Erkunt Industry, Inc., R&D Center, Ankara, Turkey

²Gazi University, Technology Faculty, Department of Metallurgical and Materials, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/12/2022
Revision: 24/02/2023
Accepted: 29/04/2023

Keywords

Vermicular Graphitic Cast Iron (VGCI)
EURO6 standard
Thermal analysis
Microstructure
Mechanical properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2022
Düzeltilme: 24/02/2023
Kabul: 29/04/2023

Anahtar Kelimeler

Vermiküler Grafitli Dökme Demir (VGCI)
EURO6 standardı
Termal analiz
Mikroyapı
Mekanik özellikler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This work, made to predetermine the quality of the engine block produced from VGCI using thermal analysis during casting. The findings showed that successful and desired quality production could be made by examining the cooling curves obtained before the casting process. / Bu çalışma; döküm sırasında termal analiz kullanılarak VGDD'den üretilen motor bloğunun kalitesinin önceden belirlenmesi için yapılmıştır. Elde edilen bulgular, döküm işlemi öncesinde elde edilen soğuma eğrilerinin incelenmesiyle başarılı ve istenilen kalitede üretim yapılabileceğini göstermiştir.



Figure A: Use of thermal analysis for structural prefixing in cast irons / **Şekil A:** Dökme demirlerde yapısal ön tespit yapılması için termal analizin kullanımı

Highlights (Önemli noktalar)

- Thermal Analysis / Termal Analiz
- Compact Graphite Iron / Vermiküler Grafitli Dökme Demir
- Structural and Mechanical properties / Yapısal ve Mekanik Özellikler

Aim (Amaç): This study was carried out to control material properties with thermal analysis applications during the production of engine block from VGCI material. / Bu çalışma, VGDD malzemenin motor bloğu üretimi sırasında termal analiz uygulamaları ile malzeme özelliklerinin kontrolü amacıyla yapılmıştır.

Originality (Özgünlük): Predicting the mechanical properties of the VGCI material by controlling the structural properties of the material with thermal analysis is the original side of the study. / Termal analiz ile VGDD malzemenin yapısal özelliklerinin kontrol edilmesiyle mekanik özelliklerinin önceden tahmini çalışmanın özgün tarafıdır.

Results (Bulgular): It was determined that the microstructure and mechanical properties can be ensured to comply with the targeted standards by using thermal analysis technique. / Yapı ve özelliklerin hedeflenen standartlara uygunluğu termal analiz kullanılarak sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): The results of the study showed that the engine block produced conformed to the standards in terms of chemical composition, structure and mechanical properties. / İnceleme sonuçları; üretilen motor bloğunun kimyasal bileşim, yapı ve mekanik özellikler bakımından standartta uygun olduğunu göstermiştir.



Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Vermicular Graphite Cast Iron by Using Thermal Analysis

Merve Ulular¹ Veysel Durak¹ Cem Uluç¹ Hasan Hasircı^{2*}

¹Erkunt Industry, Inc., R&D Center Directorate, Ankara, Turkey

²Gazi University, Technology Faculty, Department of Metallurgical and Materials, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 30/12/2022
Revision: 24/02/2023
Accepted: 29/04/2023

Keywords

Vermicular Graphite Cast Iron (VGCI)
EURO6 standard
Thermal analysis
Microstructure
Mechanical properties

Abstract

In this study, the microstructural and mechanical properties of Vermicular Graphitic Cast Iron (VGCI) material complying with EURO6 standard during engine block production were evaluated using thermal analysis. The production of this engine block was carried out in Erkunt Industry company by pot metallurgy method with a new production approach suitable for mass production. Thermal analysis technique was used as a production control tool during production. Samples taken from the produced block material were examined to analyze the microstructural and mechanical properties. The results of the study showed that the engine block produced conformed to the standards in terms of chemical composition, structure and mechanical properties. It was determined that the microstructure and mechanical properties can be ensured to comply with the targeted standards by using thermal analysis technique. Some foreign (European countries) approvals have been obtained for the produced material.

Vermiküler Grafitli Dökme Demir Malzeme Üretiminde Termal Analiz Kullanımı İle Üretilen Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2022
Düzeltilme: 24/02/2023
Kabul: 29/04/2023

Anahtar Kelimeler

Vermiküler Grafitli Dökme Demir (VGCI)
EURO6 standardı
Termal analiz
Mikroyapı
Mekanik özellikler

Öz

Bu çalışmada; EURO6 standartına uygun Vermiküler Grafitli Dökme Demir (VGDD) malzemeden motor bloğu üretimi sırasında termal analiz kullanımı ile mikroyapı ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu motor bloğunun üretimi Erkunt Sanayi firmasında seri imalata uygun yeni bir üretim yaklaşımıyla pota metalurjisi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasında termal analiz tekniği kullanılarak üretim kontrolü yapılmıştır. Üretilen blok malzemesi üzerinden alınan numunelerle mikro yapısal ve mekanik özellikler bakımından incelemeler yapılmıştır. İnceleme sonuçları; üretilen motor bloğunun kimyasal bileşim, yapı ve mekanik özellikler bakımından standarta uygun olduğunu göstermiştir. Yapı ve özelliklerin hedeflenen standartlara uygunluğu termal analiz kullanılarak sağlanabileceği tespit edilmiştir. Başarı ile üretilen malzeme için bir kısım yurt dışı (Avrupa ülkeleri) onayları da alınmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Vermicular Graphite Cast Iron (VGCI) materials are the latest addition to the family of ferrous alloys. VGCI's are better than Lamellar Graphite Cast Iron (LGCI) in terms of casting performance, high strength and toughness, and are better than Ductile Iron (DI) (or Spheroidal Graphite Cast Iron (SGCI) in terms of thermal fatigue performance and thermal conductivity. Therefore, as a new type of material, it has been widely used in cylinder blocks, cylinder heads, exhaust manifolds and brake discs in Turkey

and abroad [1-3]. While classifying cast irons according to their graphite structure, the ratio of length to width is taken. This ratio is known to be between 2-20 in VGCI's, over 50 in LGCI's and around 1 in DI's [4]. Three-dimensional SEM microstructures of vermicular graphites were observed to be interconnected in eutectic cells (Fig.1). On the other hand, these graphites are not sharp/specular but have a round/circular tip structure. This graphite structure provides high

strength, ductility compared to LGCI and better thermal conductivity compared to DI [5]. In the study by Gorny et al. the main factors affecting the structure of VGCI castings are chemical composition, cooling rate, liquid treatment and heat treatment. It is known that the cooling rate of the casting depends on the section thickness, casting temperature and thermal conductivity of the mold material [6]. Different methods and materials are used in VGCI production [4,7-10]. Among these; extensive desulphurization, nitrogen addition, incomplete treatment, in-mold, overheating, CxHx gassing, and wire treatment techniques are the main ones. The success of these methods varies with relation to their controllability. Therefore, the wire treatment technique is accepted as the most prominent and preferred method currently. In this study, vermiculation process was performed with the "crucible technique" by using the spheroidization process method and tools and equipment used in DI production, but chemically treated with different material and VGCI material production was realized.

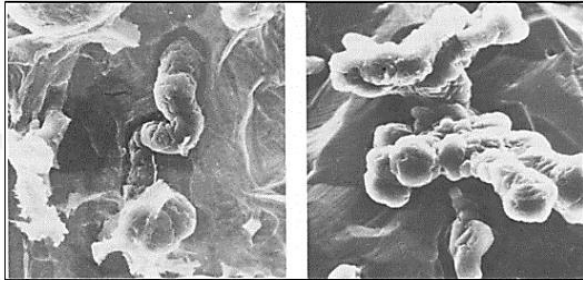


Figure 1. SEM image of two different photographs of VGCI (VGDD'in iki farklı SEM görüntü fotoğrafı) [5]

Thermal analysis method is widely used especially in cast iron casting processes. There are different thermal analysis methods and technologies [11-13]. However, basically, the behavior of materials during the transition from liquid to solid is observed to determine their structure, chemical composition, casting defects and material properties. This data is extremely useful in terms of showing how well the final casting material to be produced is suitable and accurate with the targeted structure and properties.

2. MATERIALS AND METHODS (MALZEMELER VE METOTLAR)

Dependence on foreign sources for the supply of technology and materials used in the manufacture of a product causes obstacles in production. This is because the techniques developed and the materials used have certain limitations. Therefore, these obstacles can be eliminated if there are opportunities to overcome the limitations of some properties of the materials in production. From this

point of view, in this study; engine block production was carried out from VGCI material in accordance with EURO6 standard, which we specially developed and produced with ladle metallurgy technique suitable for mass production. Considering the necessity of preliminary evaluation and controls with the application of thermal analysis during production, the characterization of the produced part in terms of structural and mechanical properties is discussed. Casting processes were started by planning on the production of the engine block, which is routinely mass-produced in Erkunt Casting Industry. Melting processes were carried out in an induction furnace with a capacity of 8 tons. As the main charge input to the induction furnace, 50% ductile iron and 50% low carbon steel were used in the form of ingots. Additional alloying elements were added as ferroalloy as required. In this study, materials with 2 different compositions were produced and analyzed in terms of VGCI production. The chemical compositions of liquid cast iron obtained by OBLF brand spectrometer at the end of melting are given in Table 1. Casting processes were carried out between 1408-1414°C using liquid metal taken from the melting furnace. Vermiculation was performed in a 1 ton capacity spheroidizing crucible. A temperature range of 1280-1300 °C was preferred as the casting temperature. The material to be cast was subjected to inoculation with FeSi and FeSiMg material in two stages, during vermiculation and before casting. Vermicular solidification was guaranteed by thermal analysis of the liquid material in the ATAS device at the beginning, middle and end of casting. The experimental work started with the production of the engine block. Metallographic measurements of the matrix structure, graphite shape and distribution of the cast engine block were carried out on samples taken from different parts of the cast part after the completion of standard polishing processes (sanding with 80-1200 mesh and polishing at 6 microns). The number and shape of graphite per unit area were analyzed from un-etched and matrix structure were analyzed from the surface of the sample etched with 3% nital at x100 magnification from different regions using a Zeiss microscope and digital images obtained from the microscope's own image analysis. Grain size measurements were made according to EN ISO 945-1:2016 standard at x100 magnification. Specimens cut from engine blocks were prepared in the dimensions specified in DIN EN 1563 standard and tensile tests were carried out at room temperature in Zwick Roell brand device with 200 kN capacity. At least 6 specimens from the same series were tested and averaged in the results section. Hardness tests were measured as Brinell in "EMCO Test Duravision 2000" hardness

tester. For this purpose, a steel ball tip with a diameter of 2.5 mm and a load of 147 N was applied. For each sample, 10 different measurements were

made and the average is given in the results section. "The values shown with xxx in Table 1. are not given due to commercial reasons."

Table 1. Chemical composition ranges of produced alloys (Üretilen alaşımların kimyasal bileşim aralıkları)

Alloy Elements (%)	C	Si	Mn	S	P	Ti	Sn	Cu	Mg	Fe
Alloy 1	3.4-3.6	2.3-2.5	0.6-0.7	0.011-0.013	0.02-0.024	0.009-0.01	0.0012-0.002	0.8-0.9	0.18-0.22	Bal
Alloy 2	3.4-3.6	2.3-2.5	0.6-0.7	0.011-0.013	0.02-0.024	0.009-0.9	0.0012-0.02	0.8-0.9	0.18-0.22	Bal

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION (DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

3.1. Thermal Analysis Results (Termal Analiz Sonuçları)

Thermal analysis measurements are widely used during the casting of cast iron materials. With these measurements; gray and white solidification tendencies before casting, solidification start temperature determination (Ts), carbon equivalence (CE) measurement, solidification temperature / time ratio (Ts/ts), amount (ΔT) and duration (Δt) of undercooling during solidification, shrinkage and expansion rates and times during solidification, solid transition temperature (Tst), eutectic point (Te) and composition change etc. data can be determined. After these determinations, the successful completion of the casting process and the desired quality of the cast material are largely guaranteed.

Two different thermal analysis data (Fig. 2) and graphs (Fig. 3) obtained during this study are also given. When both data are analyzed (Fig 2); it will be seen that the data such as MQ, ACEL, TL, TES, TELow, TS are the same or very close. This is because the start and end of solidification in lamellar and vermicular graphite cast iron materials are similar mechanisms. In lamellar graphite cast iron, solidification starts with the formation of solid matrix (austenite phase) and is completed by the precipitation of graphite between austenite grains. However, in VGCI, spherical shaped graphites (up to 20%) are also formed. The formation of these graphites is different from lamellar and vermicular. Spherical graphites are formed by the precipitation of graphite in a spherical gas bubble at the beginning of solidification and the formation of austenite phase around it in the following process. Therefore, solidification and solid shrinkage and expansion occur differently in lamellar and

vermicular graphite cast irons. When graphite is formed between the solid grains, its volume occupies more space than its proportion in the material, causing a decrease in solid shrinkage and solid shrinkage and even volumetric growth (negative shrinkage) in the produced parts. These data also allow for monitoring the amount of undercooling (T), reheating (recoalescence, R), shrinkage and expansion zones required for the formation of lamellar, vermicular and spherical graphite. Thermal analysis and cooling curves are therefore of great importance.

Looking at both data below, it is seen that they are materials with the same CE value (ACEL= 4.24 and 4.25). It will be seen that the dT/dt data in the liquid state are different in the data obtained from castings made at separate times with almost the same TL and TES temperatures. In the second data (b), it can be seen that a lower undercooling occurred, solidification occurred in a shorter time and the shrinkage during solidification was more easily met (S1). Accordingly, the amount of reheating (R) value has also decreased.

The situation will be better understood, especially when the meaning of the data mentioned in the cooling curves is expressed. Figure 3.a is obtained from cast iron with lamellar and b from cast iron with vermicular graphite. The most important differences in both curves are the undercooling (T), recalcitrance (R), the lowest (TElow) and highest (TEhigh) temperature values and the duration of the solidification process (t). The precipitation of lamellar graphite as a secondary phase during solidification is due to the formation of the first solids (austenite grains) in a shorter time. In vermicular, on the other hand, since both graphite and austenite are formed together, nucleation starts at a higher temperature (TL) and lasts for a longer time (B region) since both phases grow together.

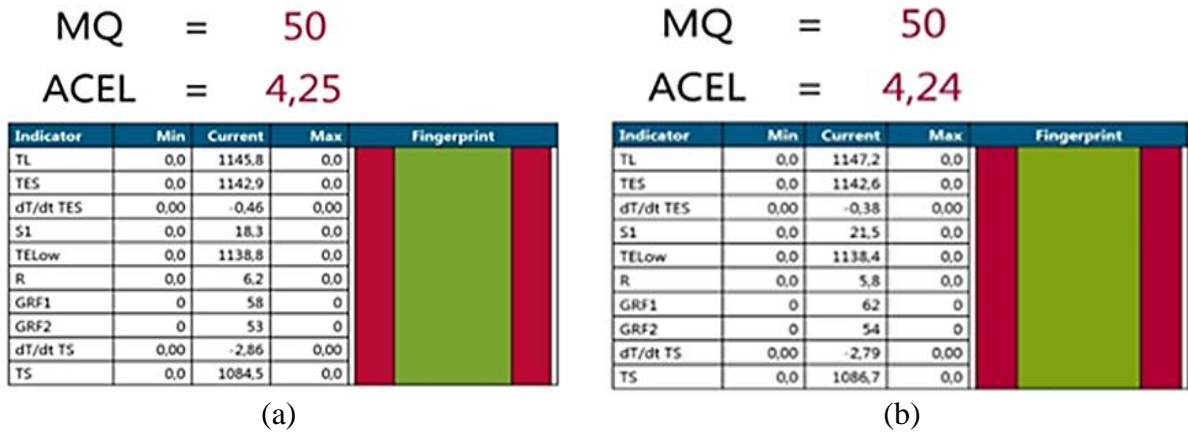


Figure 2. (a) Lamellar and (b) vermicular graphite solidified cast iron thermal analysis data ((a) Lameler ve b) vermiküler grafitli dökme demirin soğuma termal analiz verileri)

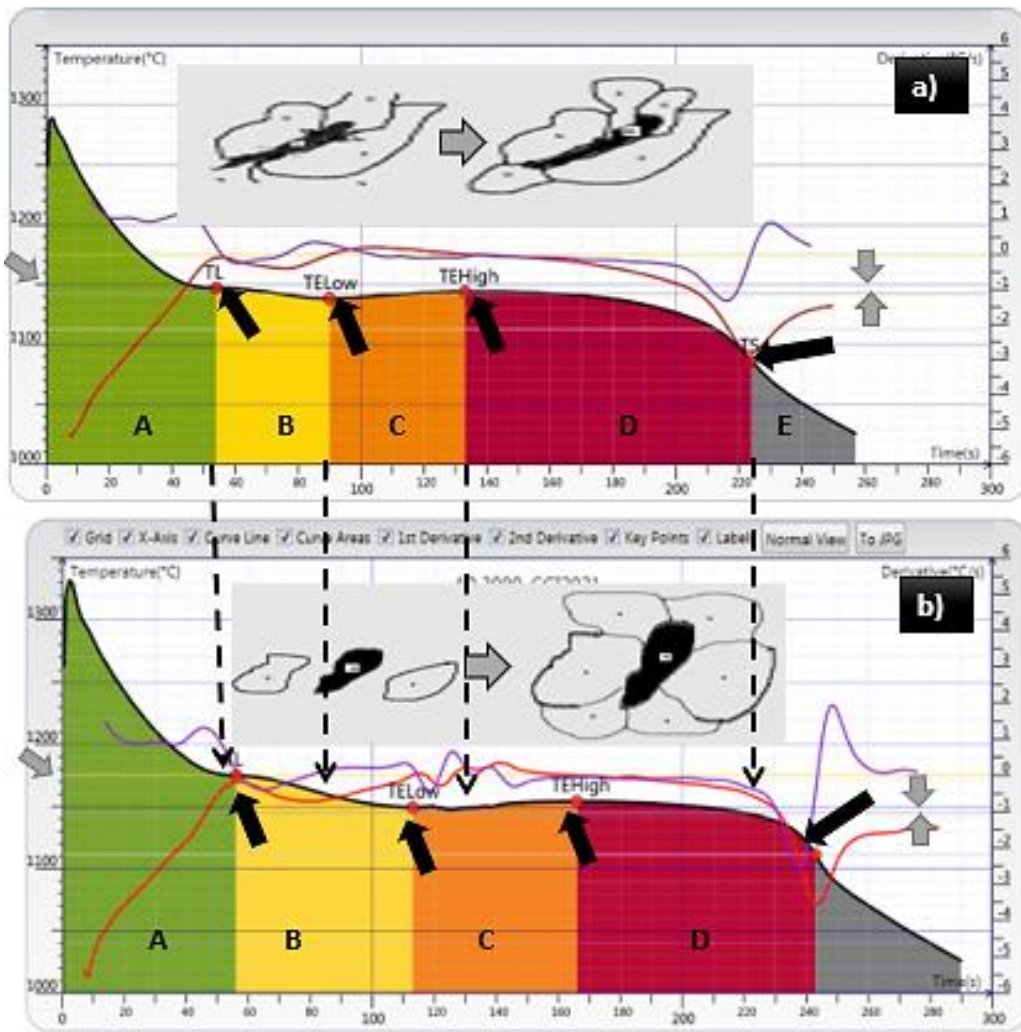


Figure 3. (a) Solidified cast iron cooling curves in the form of lamellar and (b) vermicular graphite ((a) Lameler ve b) vermiküler grafitli dökme demirin soğuma soğuma eğrileri)

The nucleation and growth of these two phases together reduced the need for undercooling (TElow) and consequently the highest temperature required for solidification (TEhigh) was low [11-13]. Lamellar graphite needs higher temperature and

time to form and grow between austenite grains. Therefore, graphite growth at higher temperature, high reheating temperature (TEhigh) and solidification completion time (D zone) occurred in the lamellar graphite material. In addition, the

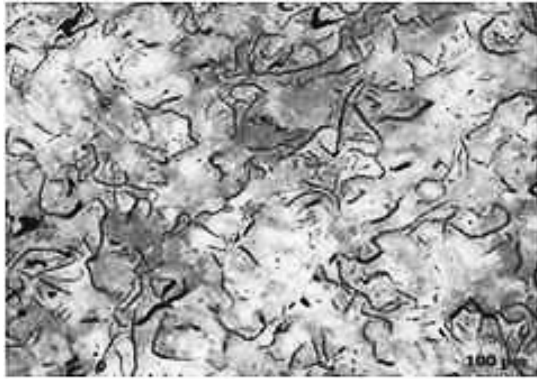
solidification end temperature (TS) is also higher in the vermicular graphite material due to the growth of both phases together and the completion of solidification.

3.2. Changes in Structural and Mechanical Properties (Yapısal ve Mekanik Özelliklerin Değişimi)

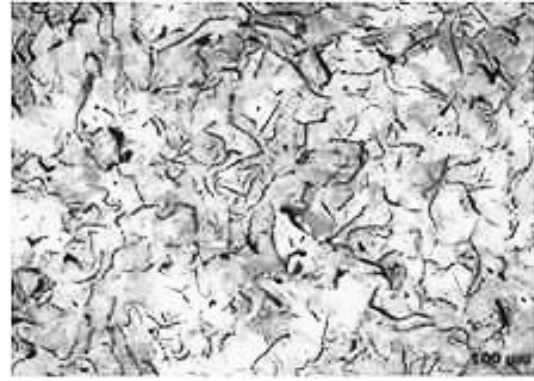
3.2.1. Structural Properties (Yapısal Özellikler)

Gray cast iron materials are generally composed of matrix + graphite structure. The matrix structure can generally be ferritic, ferrite + pearlitic, pearlite + pearlitic, pearlite + pearlitic, pearlitic in the case of casting. Apart from these, different carbides are also included. Graphite structure is spherical, lamellar and vermicular [14-17]. The graphite ratio in the structure generally varies between 9-11%. Figure 4 shows lamellar and Figure 5 shows vermicular graphite cast iron material structures. In both, the matrix is pearlite + ferritic (80 + 20% in the matrix) and the graphite volume fraction is 10.2%. Although there is very little difference in the

chemical composition of these two materials, the graphite shapes are clearly different when looking at the images of both materials. Both materials were subjected to the vermiculation process, but one material had a lamellar and the other a vermicular graphite structure. When the chemical analysis of both materials is examined, it is seen that it depends on the changes in the ratios of elements such as Ti and Sn. In the previous section, it was explained in detail what thermal analysis can tell about the casting process before casting and what can be seen from the curves. Although the general composition is the same, it is clearly seen how a change in the amount of a few elements changes the cooling characteristics of the material and changes the structure (here graphite shape). In this respect, the application and interpretation of thermal analysis can predict the structures (matrix type and/or graphite shape, etc.) that will be formed before casting, which is beneficial in preventing incorrect casting processes.



(a)



(b)

Figure 4. Lamellar graphite structure (a) and (b) (Lamel grafit yapıları, a ve b)



(a)



(b)

Figure 5. Vermicular graphite structure (a) and (b) (Vermiküler grafit yapıları, a ve b)

3.2.2. Mechanical Properties (Mekanik Özellikler)

The results obtained from tensile, impact, fatigue and hardness tests of the cast alloys are given in Table 2. When the results are analyzed; it is seen that the properties of the cast iron materials with similar matrix, but produced by changing only the graphite shape (lamellar and vermicular), have changed to a great extent. The least change was seen in hardness, while the most change occurred in elongation. With the same basic chemical composition, the properties of the material produced by changing only the graphite structure can also change significantly [14-17]. It was observed that

the properties of the two materials with lamellar and vermicular graphite structure produced with the chemical composition prepared for the production of GJV 400 material were also different. It is a known fact that properties change with the change of graphite structure. There are many researches and applications related to this. However, what is important in this study is to determine this structural change by thermal analysis before casting and to plan and perform production accordingly. Therefore, when the thermal analysis results are read correctly; the structure and properties that can be obtained after casting can be determined to a great extent.

Table 2. Changes in mechanical properties of cast iron due to lamellar and vermicular shaped graphites (Lamel ve vermiküler şekilli grafitlerden dolayı dökme demirin mekanik özelliklerindeki değişimler)

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Impact Resistance (J)	Fatigue Resistance (MPa)	Hardness (HB)
Lamellar graphite structure material	200,5 ±5	183,2 ±4	0,5 ±0.7	1,1±1	82±5	220,3±6
Vermicular graphite structure material	440,3 ±8	342 ±8	2,5 ±0.7	4,5±1	103±5	234,5±5
% Change	120	87	400	309	25	6

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

As a result of this study, the change of graphite shape and the change of mechanical properties accordingly were investigated by using thermal analysis method;

- As a result of a very small difference in chemical composition, although the casting conditions are similar, different graphite structures can be produced in different (lamellar or vermicular) shapes,
- With thermal analysis applications, differences that may occur in similar materials before casting (graphite structure, shrinkage amount, freckle formation) can be easily detected and faulty casting processes can be prevented,
- With the application of thermal analysis, the desired quality of cast iron production can be achieved,
- It has been determined that very large changes in mechanical properties can be obtained by changing only the graphite structure.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported with the project “CGI engine block production and optimization” under the R&D program of ERKUNT Casting Company.

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)

Merve ULULAR: She is responsible for the follow-up of the studies, the execution and writing of the experiments.

Çalışmaların takibinden, deneylerin yürütülmesinden ve yazılmasından sorumludur.

Veysel DURAK: He is worked in the coordination of the study.

Çalışmanın koordinasyonunda çalışmıştır.

Cem ULUÇ: He is worked in the production and coordination of the study.

Çalışmanın üretimi ve koordinasyonunda görev almıştır.

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

Deneyleri yapar, sonuçları analiz eder ve yazma işlemini gerçekleştirir.





CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

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

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Dong, J.P., Kim, H.G., and Park, Y. (2015). A Study of the oxidation of FeCrAl alloy in pressurized water and high-temperature steam environment, *Corrosion Science*, 94, 459-465. 10.1016/j.corsci.2015.02.027
- [2] Da, S. (2009). The Origin, Development and melting process of vermicular cast iron, *Modern Cast Iron*, 10, 20-26. Corpus ID: 137731482
- [3] Jiang, H. and Huang, Z.M. (2015). Experimental analysis of vermicular iron materials, *Heat Treatment Technique* 8, 12-24.
- [4] Karatay, B. (2019). *Investigation of the change of mechanical properties and thermal conductivity of vermicular graphite cast iron depending on production conditions*, Gazi University Institute of Science, Master's thesis, 25-30.
- [5] Davis, J. R. (1996). Cast Irons, ASM Speciality Handbook, ASM International.
- [6] Marcin, G., and Kawalec, M. (2013). Effects of Titanium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Walled Compacted Graphite Iron Castings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22 (5), 1519-1524. 10.1007/s11665-012-0432-8
- [7] Hrusovsky, J. P. and Wallace, J. F. (1982). Effect of Composition on Solidification of Compacted Graphite Iron, *AFS Transactions*, 90, 55-72.
- [8] Murthy, V. S., Kishore and Seshan, S. (1985). Vermicular Graphite Cast Iron-Current State of the Art, *Sadhana*, 8(4), 361-372.
- [9] König, M. (2010). Literature review of microstructure formation in compacted graphite Iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 23 (3), 185-192. 10.1179/136404609X12535244328378
- [10] Zych, J. and Żyrek, A. (2013). Vermicular cast iron production in the "Inmold" technology (in the Metalpol casting house) and the assessment of its thermal fatigue resistance, *Archives of Foundry Engineering*, 11 (3), 255-260.
- [11] Skaland, T. (2005). Understanding Ductile Iron Solidification by the Use of Thermal Analysis, Vestas Wind System A/S Windcast Group Kristiansand, Aalen Germany.
- [12] Udroui, A. (2002). The Use of Thermal Analysis for Process Control of Ductile Iron, Seminarium, NovaCast.
- [13] Avcı, Y. (2005). *Description of Casting Methods of Compact Graphite Cast Irons, Evaluation of Metallographic and Mechanical Properties*, Master Thesis, Osmangazi University, Institute of Science and Technology, 63-65.
- [14] Elmabrouk, O. (2007). An Investigation of Compacted Graphite Iron Production by Means of Thermal Analysis Technique and Other Process Control Windows, Doctoral Thesis, Middle East Technical University, Institute of Science and Technology, 10-22.
- [15] Zhang, M.X., Pang, J.C., Meng, L.J., Li, S.X., Liu, Q.Y., Jiang, A.L., and Zhang, Z.F. (2021). Study on Thermal Fatigue Behaviors of Two Kinds of Vermicular Graphite Cast Irons, *Materials Science & Engineering A*, 814,141212. 10.1016/j.msea.2021.141212
- [16] Qiaoqin, G., Yang, Z., Tao, D., Peihu, G., Yongchun, G. and Jianping, L. (2018). Effects of vermicular graphite rate on the oxidation resistance and mechanical properties of vermicular graphite iron, *Journal of Alloys and Compounds*, 765, 213-220. 10.1016/j.jallcom.2018.06.236
- [17] Fragassa, C., Radovic, N., Pavlovic, A. and Minak, G. (2016). Comparison of Mechanical Properties in Compacted and Spheroidal Graphite Irons, *Tribology in Industry*, 38, 1, 45-56. 10.1179/136404604225017474

TCGA Verilerinden H&E ile Boyanmış Örneklerden Mesane Kanseri Derecelendirmesi

Ali DEĞİRMENÇİ^{1*}  İlyas ÇANKAYA¹  Berrak GÜMÜŞKAYA ÖCAL²  Ömer KARAL¹ 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Patoloji AD, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/01/2023
Düzeltilme: 16/05/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Mesane Kanseri
Histopatoloji
Makine Öğrenimi
Tam Slayt Görüntü (TSG)
Bilgisayar Destekli Tanı (BDT)

Article Info

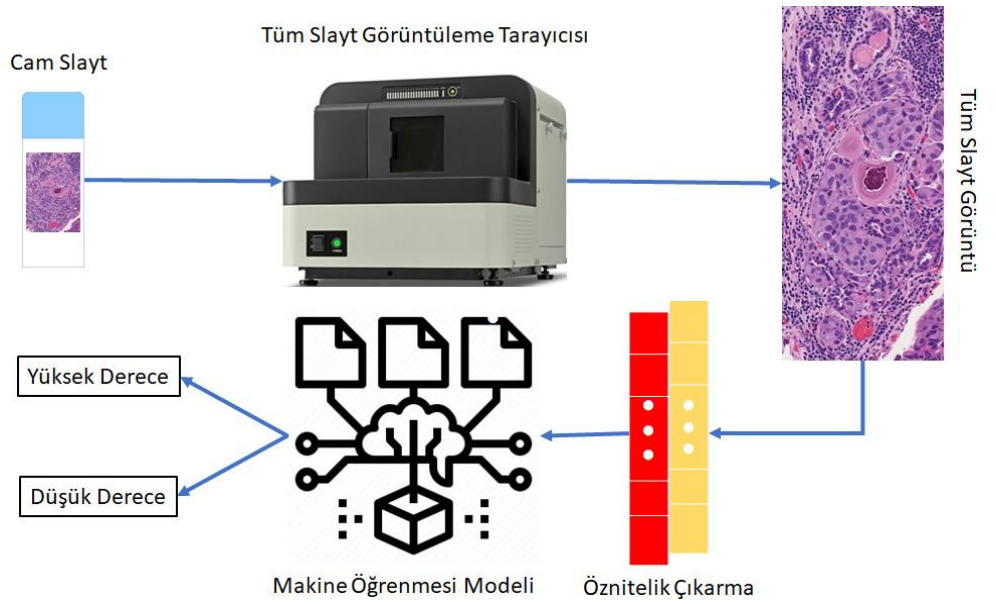
Research article
Received: 10/01/2023
Revision: 16/05/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Bladder Cancer
Histopathology
Machine Learning
Whole Slide Image (WSI)
Computer Aided Diagnosis (CAD)

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, mesane kanseri derecesini belirlemek için üç makine öğrenme yönteminin kapsamlı bir karşılaştırması yapılmıştır. / In this study, a comprehensive comparison of three machine learning methods have been performed to determine the grade of the bladder cancer.



Şekil A: Mesane kanseri derecelendirme sistemi / Figure A: Bladder cancer grading system

Önemli noktalar (Highlights)

- TCGA projesindeki WSI görüntülerinden elde edilen özellikler ile mesane kanseri derecelendirmesi yapılmıştır. / Bladder cancer grading was done with the features obtained from the WSI in the TCGA project.
- Modele özgü hiperparametre ayarı ile birlikte 3 farklı makine öğrenme yönteminin detaylı analizi yapılmıştır. / A detailed analysis of 3 different machine learning methods was made, along with the model-specific hyperparameter tuning.
- Tasarlanan bilgisayar destekli tanı aracı ile kararlardaki doğruluğun artması beklenmektedir. / With the designed computer aided diagnostic tool, it is expected that the accuracy in the decisions will increase.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, mesane kanserini derecelendiren bilgisayar destekli bir tanı sistemi tasarlamaktır. / The aim of this study is to design a computer-aided diagnosis system that grades bladder cancer.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada, Naive Bayes, k en yakın komşu ve karar ağacı makine öğrenmesi yöntemleri ile WSI'dan elde edilen öznitelikler kullanılarak mesane kanseri derecelendirmesi yapılmıştır. / In this study, bladder cancer grading was performed using features obtained from WSI using Naive Bayes, k nearest neighbor and decision tree machine learning methods.

Bulgular (Results): Karşılaştırılan yöntemler arasında en yüksek doğruluk değeri %82 ile karar ağacı yönteminde elde edilmiştir. / The highest accuracy value among the compared methods was obtained in the decision tree method with 82%.

Sonuç (Conclusion): Önerilen sistem, mesane kanseri derecelendirmesinde umut verici sonuçlar gösterdi. / The proposed system demonstrated promising results in bladder cancer grading.



TCGA Verilerinden H&E ile Boyanmış Örneklerden Mesane Kanseri Derecelendirmesi

Ali DEĞİRMENÇİ^{1*} İlyas ÇANKAYA¹ Berrak GÜMÜŞKAYA ÖCAL² Ömer KARAL¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Patoloji AD, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/01/2023
Düzeltilme: 16/05/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Mesane Kanseri
Histopatoloji
Makine Öğrenimi
Tam Slayt Görüntü (TSG)
Bilgisayar Destekli Tanı
(BDT)

Öz

Mesane kanserinin (BC) erken tanısı, hastalığın tedavisi ve seyri için büyük önem taşımaktadır. Tanı için en etkili yöntem, çeşitli işlemlerin uygulandığı doku örneğinin patoloğ tarafından mikroskop altında incelenmesidir. Ancak bu yaklaşım subjektiftir ve patoloğların bilgi ve tecrübesine bağlı olarak değişebilir. Objektifliği artırmak ve patoloğa yardımcı olmak için bu çalışma, tam slayt görüntülerinden (WSI) otomatik mesane ürotelyal karsinom derecelendirmesini sunar. Naive Bayes, k en yakın komşu ve karar ağacı gibi 3 farklı makine öğrenme yöntemi kullanılarak performans karşılaştırması yapılır. Deneysel sonuçlar, karar ağacı yönteminin %82 ile en yüksek performans elde ettiğini ve tanı sırasında patoloğa yardımcı olmak için kullanılabileceğini göstermektedir.

Bladder Cancer Grading from H&E Stained Samples from TCGA Data

Article Info

Research article
Received: 10/01/2023
Revision: 16/05/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Bladder Cancer
Histopathology
Machine Learning
Whole Slide Image (WSI)
Computer Aided
Diagnosis (CAD)

Abstract

Early diagnosis of bladder cancer (BC) is of great importance for the treatment and course of the disease. The most effective method for diagnosis is the examination of the tissue sample, on which various procedures are applied, by the pathologist under a microscope. However, this approach is subjective and may vary depending on the knowledge and experience of the pathologists. To increase objectivity and assist the pathologist, this study presents automated bladder urothelial carcinoma grading from whole slide images (WSI). Performance comparisons are made using 3 different machine learning methods such as Naive Bayes, k nearest neighbor, and decision tree. Experimental results show that the decision tree method achieves the highest performance with 82% and can be used to assist the pathologist during diagnosis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan vücudu trilyonlarca hücreden oluşur. Normal koşullarda bu hücreler vücudun normal işlevlerini yerine getirmek için büyür, bölünür, çoğalır ve ölür. Ancak bazen anormal bir şekilde büyümeye ve belirtilen orandan daha fazla bölünmeye başlarlar. Bu, 200'den fazla alt tipi olan kansere neden olur. Anormal hücre büyümesi mesaneden kaynaklanıyorsa buna mesane kanseri (BC) denir. Ürotelyal karsinom (geçiş hücreli karsinom (TCC)) en sık görülen BC tipidir (%95 insidans). Diğer BC tipleri, skuamöz hücreli karsinom (prevalans %1-2), adenokarsinom (prevalans %1) ve küçük hücreli

karsinomdur (sıklık %1'den az). Diğer kanser türlerinde olduğu gibi, çeşitli faktörlere bağlı olarak BC olasılığı artar veya azalır. Örneğin erkeklerde BC oranı kadınlara göre dört kat daha fazladır. Ayrıca, uzun süre sigara içmek, içmeyenlere kıyasla BC alma olasılığını artırır [1, 2].

Patoloğlar, bir hastanın kanser olup olmadığını incelemek ve derecesini belirlemek için mesane dokusundaki hücrelerin özniteliklerini kullanır. Doku örneği milyonlarca hücre içerir ve mikroskop altında manuel olarak analiz edilir. Bu nedenle, çok sayıda cam slaytın mikroskop altında incelenmesini gerektirir ve bu da zaman alıcıdır. Teknolojinin

ilerlemesi ile bilgisayar ortamında tüm slayt görüntüleri (WSI) farklı büyütme seviyelerinde yakalanabilmektedir. Bu, patoloğların mikroskop altında cam slaytları incelemeye gerek kalmadan hastalıkları teşhis etmelerini sağlar.

Son zamanlarda, gelişmiş bilgisayar donanımı ve makine öğrenim tabanlı yöntemlerin her geçen gün daha başarılı sonuçlar vermesi, aykırı değer tespiti [3,4], tıp [5], trafik [6], modelleme [7] gibi farklı alanlara uygulanmasının önünü açmıştır. Ayrıca, WSI'ya erişim kolaylığı ve makine öğrenim tabanlı algoritmaların kullanılabilirliği WSI'dan mesane kanseri ile ilgili çalışmalara olan ilgiyi de artırmıştır. Örneğin, Fuster ve arkadaşları [8], evrimsel sinir ağları (CNN) tabanlı bir derin öğrenme yöntemi kullanarak, kas invaziv olmayan mesane kanseri (NMIBC) hastalarının WSI'larında invaziv kanserli alanlarının tespitini gerçekleştirdi. Khosravi ve arkadaşları [9], Tissue Microarray Database (TMAD) ve The Cancer Genome Atlas (TCGA) gibi kamuya açık veri tabanlarından alınan dijital patoloji görüntülerinde akciğer, meme ve mesane kanserlerinin alt tiplerini ve biyobelirteçlerini sınıflandırmak için CNN_Smoothie adlı CNN tabanlı bir yöntem sundular. Akciğer kanseri alt tipleri için %92, meme kanseri için %91 ve mesane kanseri için ortalama %99 doğruluk elde ettiler. Yin ve arkadaşları [10], Rochester Üniversitesi Tıp Merkezi'nden elde edilen hematoksilen eozin (H&E) boyalı mesane tümörü doku görüntülerinden non-invaziv (evre Ta) ve invaziv (evre T1) BC'yi sınıflandırmak için olasılıksal sinir ağı (PNN), destek vektör makinesi (SVM), lojistik regresyon (LR), uyarlanabilir güçlendirme (Adaboost), rastgele orman (RF) ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) gibi 6 farklı makine öğrenme algoritmasının performansını değerlendirdi ve %91-96 arasında değişen doğruluklar elde etti. Jansen ve arkadaşları [11], Hollanda'daki üç farklı hastaneden elde edilen H&E boyalı slaytlardan NMIBC saptanması ve derecelendirilmesi için sinir ağı tabanlı bir yaklaşım sundu. Üç farklı patoloğun görüşleri ile karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşımın doğruluğu, düşük dereceli kanserler için %76 ve yüksek dereceli kanserler için %71'dir. Woerl ve arkadaşları [12], Erlangen Üniversitesi Klinik Hastanesi'ndeki TCGA ve Comprehensive Cancer Center Erlangen Metropolitan Area Nuremberg MIBC'den (CCC-EMN) elde edilen histopatolojik slayttan kas invaziv BC'nin (MIBC) moleküler alt tipini tahmin etmek için bir derin öğrenme modeli önerdi. Slaytları inceleyen patoloğlara kıyasla önerilen model daha iyi performans göstermiştir (ROC-AUC: 0.85 ve doğruluk: 0.75). Chen ve arkadaşları [13], Shanghai General Hospital ve

TCGA'dan alınan H&E boyalı WSI görüntülerinden hem mesane kanserini teşhis etmek hem de sağkalımı tahmin etmek için makine öğrenimine dayalı bir yöntem sundu. Deneysel sonuçlara göre, eğitim, test ve dış doğrulama kohortlarında mesane karsinomu tahmini için ROC-AUC puanları sırasıyla %96.3, %89.2 ve %94.1'dir. 1 yıllık, 3 yıllık ve 5 yıllık sağkalım tahmini için ROC-AUC skorları ise sırasıyla %77.7, %83.8 ve %81.3'tür. Lucas ve arkadaşları [14], 1 yıllık ve 5 yıllık NMIBC nüksünü tahmin etmek için hem klinik hem de histopatolojik verileri birleştiren derin öğrenmeye dayalı bir model kullanmıştır. U-net mimarisi kullanılarak histopatolojik slaytların (normal ve kötü huylu) üretelyumu bölütlere ayrılmıştır. ImageNet veri setiyle önceden eğitilmiş VGG16 mimarisine 224 × 224 görüntü parçacıkları (patch) öznitelikler çıkartılmıştır. Gated recurrent unit (GRU) sınıflandırma mimarisine çıkartılan öznitelikler ve klinik veriler birleştirilerek yapılmıştır. Modelin 1 yıl ve 5 yıllık nüksüz hayatta kalmadaki ROC-AUC skorları sırasıyla 0.62 ve 0.76'dir. Tokuyama ve arkadaşları [15], 2 farklı makine öğrenme algoritmasıyla (RF ve SVM) transüretal rezeksiyondan sonraki 2 yıl içinde NMIBC'nin nüksünü tahmin etti. "İlastik" (<https://www.ilastik.org>) ücretsiz yazılımı ile çekirdekler bulunmuş. Bulunan çekirdeklerden birbirine değenler YOLO v3 derin öğrenme modeli kullanılarak ayrılmıştır. "CellProfiler" (<https://cellprofiler.org>) yazılımı kullanılarak bölütleme aşamasında elde edilen çekirdeklerin yapısal ve doku (texture) öznitelikleri çıkartılmıştır. Deneysel sonuçlara göre destek vektör makinesi ile %90 ve rastgele orman metodunda ise %86.7 doğruluk oranları elde edilmiştir. Bhambhani ve arkadaşları [16], mesane kanserinden 5 yıllık hastalığa özgü ve genel sağkalımı tahmin etmede yapay sinir ağları (ANN) ve Cox orantılı tehlikeler (CPH) modelleri yöntemlerinin başarısını karşılaştırmışlardır. Çalışmada yaş, cinsiyet, ırk, tümör boyutu, evre, derece, lenf nodu invazyonu, tümörün yayılma derecesi ve cerrahi müdahale özniteliklerden oluşan 160.000'den fazla hastadan alınan veriler kullanılmıştır. ANN metodunun eğri altındaki alan-alıcı çalışma karakteristikleri (ROC-AUC) performans metriğindeki başarıları hastalığa özgü tahminde 0.80 ve genel sağkalımı tahminde ise 0.81'dir. CPH metodu ise hastalığa özgü tahminde ve genel sağkalımı tahminde ROC-AUC skorları sırasıyla 0.81 ve 0.70'dir. Song ve arkadaşları [17], mesane kanserli hastaların 10 yıllık sağkalımını tahmin etmek için doğrusal regresyon temelli makine öğrenmesi metodu önermişlerdir. Metodun eğitilmesinde popülasyon temelli bir veri seti kullanılmış ve bu veri seti 1228 tane hastanın klinik ve moleküler özniteliklerini içermektedir. Bu

hastalardan 417 tanesinin ölüm nedeni mesane kanserinden kaynaklanmaması veya bilinmemesi sebebiyle çıkartılmıştır. Oluşturulan modelin tahminini en çok etkilen öznelikler yaş, kas invazivliği, p53 yoğunluğu, PTCH LOH pozitifliği ve paket yılı (sigara içme)'dir. Modelin 10 yıllık mesane kanseri hastalığı sağkalımını öngörme başarısı ROC-AUC'de 0.77 ve F1 skoru 0.78'dir. Zheng ve arkadaşları [18], BLCA'nın tanısı ve MIBC hastalığında hayatta kalma tahmininin yapılmasına yönelik olarak derin öğrenme temelli BlcaMIL ve MibcMLP adlı iki model geliştirmiştir. Bu iki modelin eğitilmesi için TCGA'dan 412 BLCA hastasına ait 926 WSI ve doğrulanması için Wuhan Üniversitesi Renmin Hastanesinden 150 BLCA hastasına ait 250 WSI kullanılmıştır. BLCA tanısında kullanılan BlcaMIL modelinin doğruluğu 0.987'dir. Ayrıca, MIBC hastalığında sağkalım öngörmede kullanılan MibcMLP modelinin C-index değerleri sırasıyla iç ve dış doğrulama setlerinde 0.631 ve 0.622 olarak elde edilmiştir. Aynı yazarların bir diğer çalışmasında, H&E boyalı WSI görüntülerindeki tümör-stroma oranı (TSO) makine öğrenmesi metotlarıyla belirlenmiş ve MIBC'de TSO'nun prognostik önemi araştırılmıştır [19]. 133 ve 261 MIBC hastası iki bağımsız kohort üzerinde yapılan deneylerin tek değişkenli ve çok değişkenli Cox regresyon analizleri sonuçlarına göre TSO'nun MIBC hastalığının prognozunda ve karar verilmesinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Yukarıda belirtilen literatür çalışmaları göz önüne alındığında, mesane kanseri olan hastalarda kanser alt tipi, biyobelirteçler ve sağkalım oranları tahmin edilmektedir. Mevcut araştırmalardan farklı olarak, bu çalışma, tam slayt görüntülerinden yeni bir otomatik mesane ürotelyal karsinom derecelendirmesi sunar. Mesane kanserinin erken teşhisi, hastalığın tedavisi ve seyri için büyük önem taşımaktadır. Mesane kanseri teşhisi için en etkili yöntem, bazı ön işlemlerin uygulandığı doku örneğinin patoloğ tarafından mikroskop altında analiz edilmesidir. Ancak bu yaklaşım subjektiftir ve patoloğdan patoloğa değişebileceği gibi patoloğların bilgi ve tecrübesine bağlı olarak da değişebilmektedir. Önerilen yaklaşım hem patoloğlara yardımcı olmayı hem de objektifliği artırmayı sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, mesane kanserinin derecelendirilmesi kapsamında literatürde sıklıkla kullanılan öznelikler araştırılmıştır. Hücrelerdeki yapısal ve istatistiksel özneliklerin mesane kanserinin derecelendirilmesinde oldukça belirleyici olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen çalışma kapsamında, TCGA projesindeki BLCA veri setindeki hastalara ait WSI'dan elde edilen alan, uzunluk, standart

sapma, varyans ve üçüncü moment öznelikleri kullanılmıştır. Bu öznelikler kullanılarak üç farklı makine öğrenim tabanlı yöntemlerin (Naive Bayes, karar ağacı ve kNN) mesane kanserinin derecelendirilmesindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, karar ağacı ve kNN metotlarında detaylı hiperparametre analizi de yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre kullanılan özneliklerle en iyi sonuçlar karar ağacı metoduyla elde edilmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2, veri seti hakkında bilgi verir. 3. bölümde, uygulanan makine öğrenimi yöntemleri açıklanmıştır. 4. bölümde, deneysel sonuçlar değerlendirilmektedir. Son bölümde ise çalışmanın çıktıları ve gelecekte geliştirilmeye açık yönleri verilmiştir.

2. VERİ SETİ (DATA SET)

The The Cancer Genome Atlas (TCGA) projesi kapsamında kanser araştırmalarında kullanılmak üzere veriler toplanmış ve erişim için kamuya açık hale getirilmiştir (<https://portal.gdc.cancer.gov>). Bu nedenle etik kurul raporu gerektirmemektedir. TCGA projesi kapsamında toplan veriler 33 kanser türünü temsil eden 10.000'den fazla tümörden elde edilen moleküler ve klinik bilgileri içerir. Bu çalışma kapsamında kanser türünü/derecesini belirlemek için mesane ürotelyal karsinomuna ait tüm slayt tarama görüntülerinden elde edilen öznelikler kullanılmıştır [20]. Öznelikler alan, uzunluk, standart sapma, varyans ve üçüncü moment olmak üzere 5 tanedir.

3. YÖNTEMER (METHODS)

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan üç farklı makine öğrenim tabanlı algoritma tanıtılır.

3.1 Naïve Bayes (Naïve Bayes)

Naïve Bayes sınıflandırıcı, verileri sınıflandırmak için kullanılan olasılık tabanlı bir makine öğrenme modelidir [21]. Adından da anlaşılacağı üzere Naive Bayes sınıflandırıcının prensibi Bayes teoremine dayanmaktadır. Naive olarak adlandırılmasının nedeni, Naive Bayes bir sınıflandırıcı, sınıfın belirli bir özneliğin varlığının başka herhangi bir özneliğin varlığı ile ilgisi olmadığını varsaymasıdır. Yani verideki özneliklerin birbirinden bağımsız olduğunu kabul eder. Ayrıca, Naive Bayes sınıflandırıcıda her özneliğe aynı ağırlık (önem) verilir. Diğer bir ifadeyle, Naive Bayes sınıflandırıcısı, bir sınıftaki belirli bir özneliğin varlığının başka herhangi bir özneliğin varlığıyla ilgili olmadığını varsayar ve

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

- $P(A|B)$: B olayı verildiğine A olayının koşullu olasılığı
- $P(B|A)$: A olayı verildiğine B olayının koşullu olasılığı
- $P(A)$: A olayının gerçekleşme olasılığı
- $P(B)$: B olayının gerçekleşme olasılığı

ile ifade edilir.

Naive Bayes sınıflandırıcı algoritmasında, her bir veri için her bir durumun olasılığı hesaplanır ve olasılık değeri en yüksek olana göre sınıflandırma yapılır.

3.2 Karar Ağacı (Decision Tree)

Karar ağacı, sınıflandırma problemlerini çözmek için kullanılan denetimli bir makine öğrenim algoritmasıdır [22]. Karar ağacı algoritması, kök düğümü, dalları ve karar düğümlerini içeren bir ağaç şeklinde modellenir. Ağaç yapısı oluşturulurken öznitelikler arasındaki belirsizlik hesaplamaları yapılır. Entropi veya Gini indeksi, ağacın kök düğümünden (dallar vasıtasıyla) karar düğümlerine doğru akan bilgi kazanımının hesaplanmasında kullanılan kriterlerdir. Bilgi kazanımı ile veri setini en iyi iki eşit parçaya bölen öznitelikler belirlenir. Aynı prosedürler dallar için de geçerlidir ve hepsi karar düğümlerinde bir sonuca varmaktadır. Karar ağacı algoritması, model eğitildikten sonra test verisi için oldukça hızlı cevap verir ve veri üzerinde herhangi bir ölçeklendirme gerektirmez.

3.3 k En Yakın Komşu (k Nearest Neighbor)

k en yakın komşu (kNN) algoritması hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılan algoritmalarından biridir [23, 24]. Sınıflandırma problemlerinde basit bir yapıya sahip olması ve öğrenme aşaması gerektirmemesi, eksik veriler üzerinde de çalışabilmesi gibi önemli avantajları nedeniyle oldukça tercih edilir. kNN algoritması kullanıcıdan k hiperparametresini alır ve eğitim kümesindeki sorgu noktasına en yakın k veri noktasını bulur. En yakın örneklerin belirlenmesinde ise mesafe metrikleri kullanılmaktadır. k hiperparametresi ile birlikte mesafe metriği kNN algoritmasının performansı belirlemede oldukça kritik öneme sahiptir. Optimum k değerinin belirlenmesi hala bir zorluktur. Küçük k değerleri için, model eğitim verilerine fazla uyum sağlayabilir ve doğrulama

verilerinde yüksek hatalara neden olabilir. Yüksek k değerleri için, model muhtemelen eğitim veya doğrulama verilerinden herhangi birine uymayabilir. Çalışmamızda belirlenen aralıkta k değerleri analiz edilerek optimum k parametresi hesaplanmıştır.

Literatürde genellikle Öklid mesafesi tercih edilmesine rağmen, farklı uygulama alanlarında ihtiyaca bağlı olarak farklı benzerlik ölçütleri de önerilmiştir. Söz konusu benzerlik ölçütlerinin formülleri aşağıda ayrı ayrı detaylı olarak verilmiştir. Formüllerde, x ve y birbirleri ile arasındaki benzerliğin hesaplanacağı örnekleri, i ve j , o örneklerin özniteliklerinin indekslerini, d ise veri setindeki öznitelik sayısını belirtmektedir.

3.3.1 Minkowski Metriği (Minkowski Metric)

Minkowski mesafe metriği Manhattan, Öklid gibi farklı mesafe metriklerinin türetildiği genel bir metrik formülüdür. Denklemdaki p sayısı 1'den daha büyük veya eşit olduğu durumlarda metrik koşullarının tamamını sağlarken, p değeri 1'den küçük olduğunda üçgen eşitsizliği koşulunu sağlamamaktadır. Minkowski

$$d_{Minkowski} = \left(\sum_{i=1}^d |x_i - y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

3.3.2 Manhattan Metriği (Manhattan Metric)

L1-norm, şehir bloğu veya taksi mesafesi olarak da adlandırılan Manhattan mesafesi, Minkowski mesafesinde p 'nin 1'e eşit olduğu durumdur. Öznitelikler arasındaki mutlak farkların toplamını hesaplamaktadır. Manhattan metriği

$$d_{Manhattan} = \sum_{i=1}^d |x_i - y_i| \quad (3)$$

ile tanımlanmaktadır.

3.3.3 Öklid Metriği (Euclidean Metric)

L2-norm olarak da bilinen Öklid mesafe metriği, Minkowski mesafesinde p 'nin 2 ye eşit olduğu özel bir durumdur. Bu metrikte, iki örneğin arasındaki düz çizgi mesafesi Öklid uzayında hesaplanmaktadır. Öklid mesafesi iki örneğin karşılık gelen öznitelikleri arasındaki farkın karelerinin toplamının karekökünün alınmasıyla hesaplanmaktadır. Öklid metriği

$$d_{\text{Öklid}} = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

3.3.4 Kare Öklid Mesafesi (Squared Euclidean Distance)

Kare Öklid mesafesi, metrik olma koşullarından üçgen eşitsizliğini sağlamadığından bir metrik değildir. Karekök Öklid mesafesi basitçe Öklid mesafesinin karekökünün alınmış versiyonudur. Karekök işlemi yapılmadığı için kümeleme Öklid metriğinden daha hızlı yapılmaktadır. Karekök Öklid mesafesi

$$d_{\text{Karekök-Öklid}} = \sum_{i=1}^d (x_i - y_i)^2 \quad (5)$$

ile tanımlanmaktadır.

3.3.5 Chebyshev Metriği (Chebyshev Metric)

Chebyshev metriği literatürde satranç tahtası mesafesi, maksimum metrik veya L_∞ metriği gibi farklı isimlerle de anılır. Bu mesafe metriği, iki örneğin karşılık gelen öznitelikleri arasındaki farkların mutlak değerini bulur ve ardından bu farkların en büyüğüne eşittir. Chebyshev metriği matematiksel olarak

$$d_{\text{Chebyshev}} = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\left(\sum_{i=1}^d |x_i - y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right) = \max_i |x_i - y_i| \quad (6)$$

ile ifade edilmektedir.

3.3.6 Bray-Curtis Benzerlik Ölçütü (Bray-Curtis Similarity Measurement)

Bu benzerlik ölçütünde, iki örnekteki karşılık gelen özelliklerin farklılıklarının mutlak değerlerinin toplamına bölünmesiyle uzaklık hesaplanır. Bu benzerlik ölçütünde örneklerdeki tüm öznitelikler pozitif olduğunda, benzerlik ölçüsü 0 ile 1 arasında değişir. Aynı durumda Bray-Curtis benzerlik ölçütünün değeri, örnekler arasındaki benzerlik arttıkça 0'a, benzerlik azaldıkça 1'e yaklaşmaktadır. Bray-Curtis benzerlik ölçütü de metrik koşulların üçgen eşitsizliği koşulunu sağlamadığı için bir metrik değildir. Bray-Curtis benzerlik ölçütü

$$d_{\text{Bray-Curtis}} = \frac{\sum_{i=1}^d |x_i - x_i|}{\sum_{i=1}^d (x_i + x_i)} \quad (7)$$

ile hesaplanmaktadır.

3.3.7 Canberra Metriği (Canberra Metric)

Canberra mesafesi, Manhattan mesafesinin ağırlıklı versiyonudur ve iki örneğin öznitelikleri arasındaki kesirli farkların toplamını hesaplar. Özniteliklerin kesir farkı 0 ve 1 arasında değerler almasına rağmen Canberra mesafesinin değer aralığı 0 ve 1 aralığında değildir. Bu özelliği nedeniyle gereksiz (spam) mail algılama başta olmak üzere aykırı değerlerin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Canberra mesafe metriği

$$d_{\text{Canberra}} = \sum_{i=1}^d \frac{|x_i - y_i|}{|x_i| + |y_i|} \quad (8)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır.

3.3.8 Kosinüs Benzerlik Ölçütü (Cosinus Similarity Measurement)

Kosinüs benzerliği, iki örnek (vektörler) arasındaki mesafeden ziyade açının kosinüsünü kullanmaktadır. Bu benzerlik ölçütünde sıfır ve bir arasında sonuçlar alınmaktadır. Sonuç sıfıra yaklaştıkça benzerlik artmakta, bir'e yaklaştıkça ise benzerlik azalmaktadır. Sıfır değeri elde edildiğinde maksimum benzerlik, bir değerinde ise minimum benzerlik oluşmaktadır. Bu nedenle, kosinüs benzerlik ölçütü örnekler arasındaki benzerliğin derecesini hesaplamaktadır. Üçgen eşitsizliği koşulunu sağlamadığı için kare Öklid mesafesinde olduğu gibi bir metrik değildir. Kosinüs benzerlik ölçütü

$$D_{\text{Kosinüs}} = 1 - \left(\frac{x_i^T y_i}{\|x_i\| \|y_i\|} \right) \quad (9)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

3.3.9 Korelasyon Metriği (Correlation Metric)

Korelasyon mesafesi, Pearson korelasyon katsayısından türetilen bir mesafe ölçütüdür. Korelasyon katsayısı, iki örneğin arasındaki doğrusal bağımlılığın derecesinin belirlenmesinde kullanılır. Bu katsayı -1 ile +1 arasında değişen değerler almaktadır. Katsayı sıfıra yaklaştıkça

örnekler arasında doğrusal ilişki azalmamaktadır. Katsayı +1'e yaklaştığında pozitif doğrusal ilişki olmakta, -1'e yaklaştıkça ise negatif doğrusal olmaktadır. İlişkinin düzeyini ise ± 1 'e olan yakınlığı belirlemektedir. Katsayı 0'a eşit olduğunda ilişki yok, ± 1 olduğunda ise mükemmel ilişki şeklinde yorumlanmaktadır. Korelasyon mesafesi

$$D_{Korelasyon} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^d (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^d (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

burada,

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^d x_i$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^d y_i$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır.

4. DENEYSSEL ANALİZ (EXPERIMENTAL ANALYSIS)

Çalışmanın bu bölümünde makine öğrenim tabanlı algoritmaların TCGA projesi kapsamında toplanan mesane ürotelyal karsinomuna ait tüm slayt tarama görüntüleri üzerindeki performanslarını değerlendirmek için kullanılan metrikler ve analiz sonuçları verilir.

4.1 Performans Metrikleri (Performance Metrics)

Makine öğrenmesi metotlarının başarılarını ölçebilmek ve birbirleriyle karşılaştırmasını yapabilmek için farklı performans metrikleri kullanılmaktadır. Bu metotlardan sınıflandırma problemleri için tasarlanan metotlarının karşılaştırılmasında kullanılan en yaygın performans metrikleri doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru'dur. Bu metrikler karmaşıklık matrisinden üretilmiştir ve bu matris Tablo 1'de verilmiştir. Karmaşıklık matrisi, bir sınıflandırma metodunun sonuçlarının veri setindeki gerçek sonuçlarla karşılaştırılarak özet halinde gösterimine olanak sağlamaktadır.

Tablo 1. Sınıflandırma metotları için karmaşıklık matrisi (Complexity matrix for classification methods)

		Gerçek Sınıf	
		Pozitif	Negatif
Öngörülen Sınıf	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Pozitif (YP)
	Negatif	Yanlış Negatif (YN)	Doğru Negatif (DN)

Doğruluk, metot tarafından doğru olarak yapılan tahminlerin veri setindeki tüm örneklerin sayısına bölünmesiyle elde edilir. Doğruluk

$$Doğruluk = \frac{DP + DN}{DP + YP + DN + YN} \quad (11)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Duyarlılık, gerçekte pozitif olan örneklerin oransal olarak makine öğrenmesi tarafından ne kadar doğrulukla tahmin edildiğinin bir göstergesidir. Duyarlılık

$$Duyarlılık = \frac{DP}{DP + YN} \quad (12)$$

eşitliği ile gösterilmektedir.

Kesinlik, metodun doğru olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekte doğru olan örneklerin sayısına oranlanması ile bulunmaktadır. Kesinlik

$$Kesinlik = \frac{DP}{DP + YP} \quad (13)$$

ile hesaplanmaktadır.

F1-skoru, duyarlılık ve kesinlik performans metriklerinin harmonik ortalaması alınarak bulunmaktadır. Duyarlılık ve kesinliğin tek metrikle analizine olanak sağlamaktadır. F1-skoru

$$F1 - skoru = \frac{2 \times Duyarlılık \times Kesinlik}{Duyarlılık + Kesinlik} \quad (14)$$

biçiminde tanımlanmaktadır.

Makine öğrenim tabanlı algoritmaların analizinde veri seti eğitim ve test setleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Eğitim seti ile model oluşturulurken test verisi ile oluşturulan bu modelin başarıları performans metrikleri aracılığıyla belirlenir. Burada eğitim ve test verileri kullanıcı tarafından belirlenen

oranlar dahilinde rastgele olarak ayrılmaktadır. Rastgele ayırım sebebiyle makine öğrenim tabanlı algoritmaları veri setine aşırı uyum veya eksik uyum gösterebilmektedir. Bir diğer ifadeyle, eğitim ve test setlerinin ayırımına bağlı olarak algoritmaların performansı oldukça farklı sonuçlar gösterebilmekte ve yanıltıcı bilgiler üretebilmektedir. Daha gürbüz sonuçlar elde edebilmek için makine öğrenim tabanlı algoritmalarda K -katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde veri seti rastgele olarak K tane eşit alt kümeye bölünür ve bunlardan bir tanesi test için ayrılır kalan $K - 1$ tane alt küme ile uygulanan makine öğrenim tabanlı model eğitilir. Eğitilen model ayrılan alt küme ile test edilir. Bu işlem her alt küme için K defa tekrarlanır ve elde edilen performans sonuçlarının ortalaması alınarak uygulanan algoritmanın performansı hesaplanır. K -katlı çapraz doğrulama yönteminde veri setindeki bütün örnekler hem eğitim hem de testte kullanılacağı için metodun performansı hakkında daha gürbüz sonuçlar elde edilir.

4.2 Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

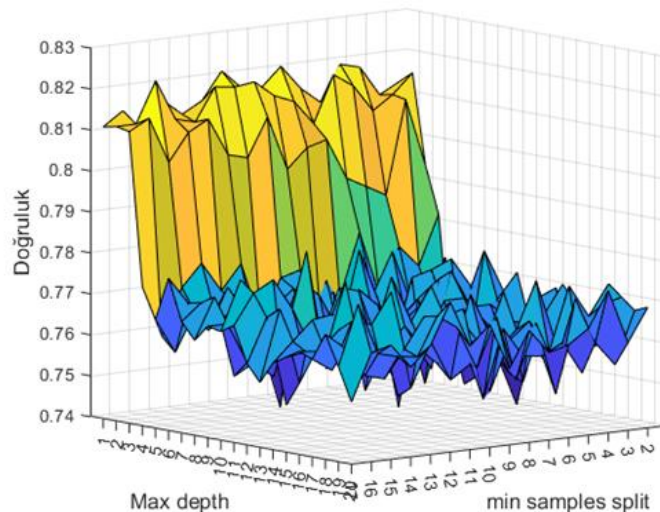
Veri setindeki hastalar yüksek derece ve düşük derece mesane karsinomlarına ait WSI'dan oluşmaktadır. Bu çalışmada üç farklı makine öğrenmesi algoritmasıyla mesane karsinomunun derecesinin tahmini yapılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmalarının performansı hiperparametrelere bağlı olarak değişmektedir ve bu hiperparametrelerin kullanılan veri setine göre optimize edilmesi gerekmektedir. Hiperparametre alan algoritmaların analizini kolaylaştırmak için her bir algoritmanın belirlenen hiperparametre aralığındaki doğrulukları kullanılan performans metrikleri ile görselleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmadaki tüm programlar Python 3.8.8 kullanılarak yazılmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin uygulanması ve performans sonuçlarının hesaplanmasında Sklearn (1.1.1) ile Numpy (1.22.3) modülleri kullanılmıştır.

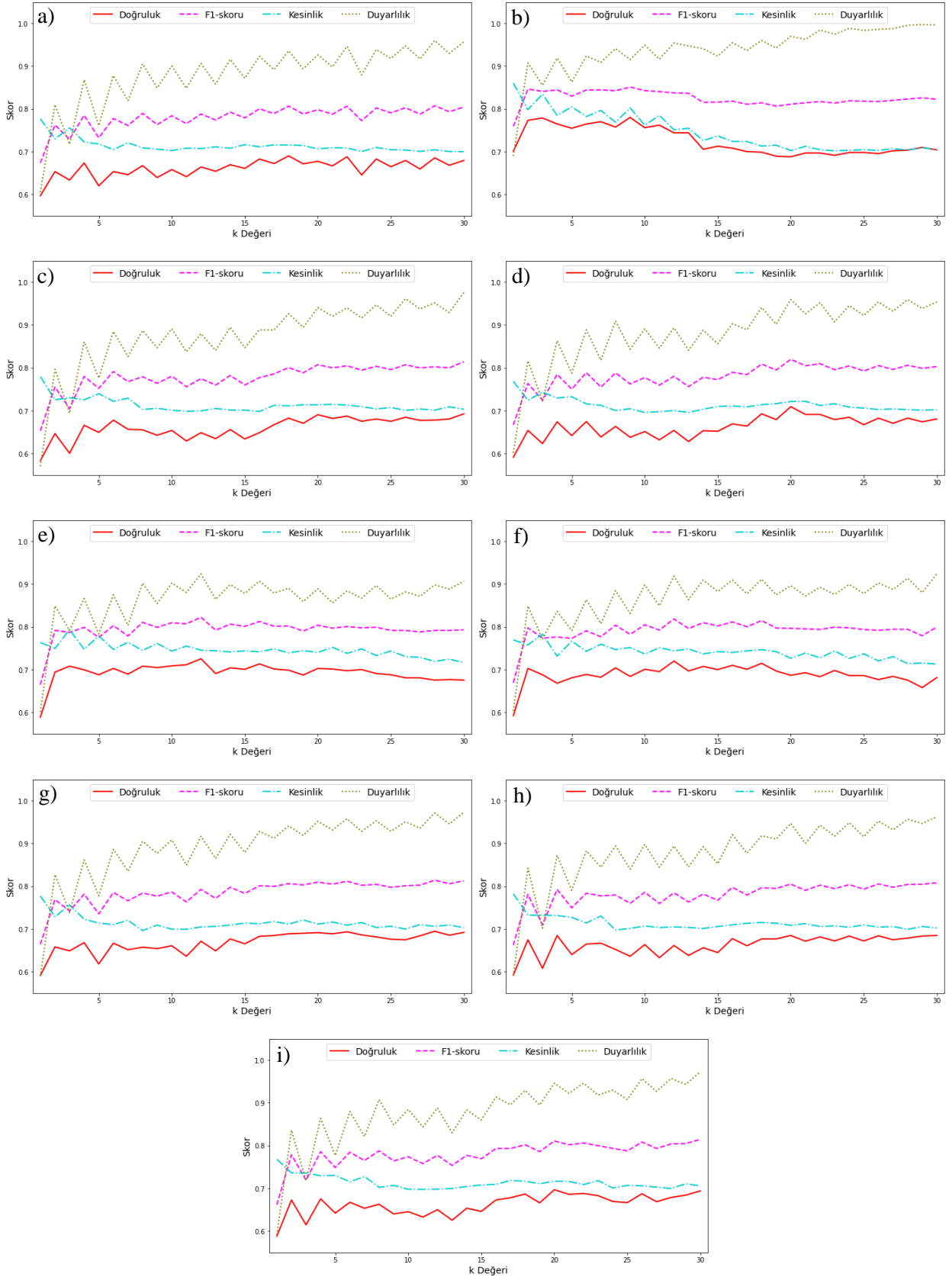
Objektif ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek adına algoritmaların performansı belirlenirken K -katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış ve K sayısı 5 seçilerek 10 defa tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçların ortalamaları performans olarak verilmiştir.

Naive Bayes sınıflandırıcısı kullanıcı tanımlı hiperparametre almadığı için analiz yapılmamıştır.

Karar ağacı algoritması kapsamında maksimum ağaç derinliği (*max_depth*) ve minimum örnek sayısı (*min_samples_split*) hiperparametrelerinin belirlenen aralıktaki optimal değerleri araştırılmıştır. Optimal *max_depth* hiperparametresinin değeri 1 ile 20 aralığında 1'er artırılarak aranırken, *min_samples_split* hiperparametresinin optimal değeri ise 2 ile 17 aralığında 1'er artırılarak aranmıştır. Yapılan analize ilişkin elde edilen doğruluk oranları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1 dikkatlice incelendiğinde *min_samples_split* hiperparametresinin veri setinde gözle görülür bir etkiye sahip olmadığı, ancak *max_depth* hiperparametresinin düşük değerlerinde (1 - 2) algoritmanın en yüksek doğruluk oranlarını elde ettiği, hatta daha büyük değerlerde performansta gözle görülür kayıplar yaşandığı görülmüştür. Gerçekleştirilen bu analiz sonucunda karar ağacı algoritmasının kullanıcı tanımlı hiperparametreleri *max_depth* ve *min_samples_split* sırasıyla, en yüksek doğruluk oranının elde edildiği, 2 ve 15 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Karar ağacı metodunun doğruluk değeri sonuçları (Accuracy results of the decision tree method)



Şekil 2. Farklı mesafe metrikleri için kNN yönteminde artan k parametresinin doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1- skorlarına etkisi (a) Bray-Curtis, (b) Canberra, (c) Chebyshev, (d) Kare Öklid, (e) Korelasyon, (f) Kosinüs, (g) Manhattan, (h) Minkowski, (i) Öklid (The effect of increasing k parameter on accuracy, precision, precision and F1- scores in kNN method for different distance metrics (a) Bray-Curtis, (b) Canberra, (c) Chebyshev, (d) Square Euclidean, (e) Correlation, (f) Cosine, (g) Manhattan, (h) Minkowski, (i) Euclidean)

Tablo 2. kNN yönteminde artan k hiperparametresinin farklı mesafe ölçütlerinin doğruluk performans metriği üzerindeki etkisi (The effect of increasing k hyperparameter on the accuracy performance metric of different distance measures in the kNN method)

k	Bray-Curtis	Canberra	Chebyshev	Kare Öklid	Korelasyon	Kosinüs	Manhattan	Minkowski	Öklid
1	0.5967	0.7007	0.5833	0.5913	0.5887	0.5920	0.5913	0.5920	0.5880
2	0.6533	0.7733	0.6467	0.6540	0.6940	0.7027	0.6580	0.6747	0.6727
3	0.6333	0.7787	0.6007	0.6233	0.7080	0.6880	0.6487	0.6080	0.6147
4	0.6733	0.7647	0.6660	0.6740	0.6993	0.6680	0.6680	0.6847	0.6753
5	0.6200	0.7547	0.6493	0.6420	0.6880	0.6807	0.6180	0.6400	0.6420
6	0.6533	0.7647	0.6780	0.6747	0.7027	0.6887	0.6667	0.6647	0.6673
7	0.6460	0.7700	0.6567	0.6387	0.6893	0.6820	0.6513	0.6667	0.6533
8	0.6673	0.7573	0.6553	0.6633	0.7080	0.7040	0.6573	0.6520	0.6627
9	0.6393	0.7800	0.6427	0.6380	0.7047	0.6840	0.6540	0.6360	0.6400
10	0.6580	0.7560	0.6540	0.6513	0.7087	0.7007	0.6607	0.6633	0.6453
11	0.6413	0.7620	0.6293	0.6320	0.7113	0.6953	0.6360	0.6327	0.6327
12	0.6640	0.7440	0.6487	0.6540	0.7253	0.7200	0.6713	0.6613	0.6500
13	0.6540	0.7440	0.6347	0.6280	0.6907	0.6967	0.6487	0.6380	0.6253
14	0.6693	0.7053	0.6560	0.6533	0.7040	0.7073	0.6767	0.6560	0.6533
15	0.6607	0.7127	0.6340	0.6520	0.7007	0.7000	0.6653	0.6447	0.6460
16	0.6827	0.7080	0.6487	0.6693	0.7133	0.7100	0.6827	0.6773	0.6727
17	0.6720	0.7000	0.6673	0.6640	0.7013	0.7007	0.6847	0.6607	0.6780
18	0.6900	0.6987	0.6827	0.6927	0.6987	0.7147	0.6887	0.6767	0.6867
19	0.6713	0.6893	0.6707	0.6793	0.6873	0.6967	0.6900	0.6767	0.6660
20	0.6773	0.6880	0.6907	0.7093	0.7027	0.6867	0.6913	0.6847	0.6967
21	0.6667	0.6967	0.6820	0.6913	0.7013	0.6927	0.6887	0.6713	0.6860
22	0.6880	0.6967	0.6873	0.6913	0.6973	0.6833	0.6933	0.6813	0.6880
23	0.6453	0.6913	0.6753	0.6793	0.7000	0.6980	0.6860	0.6720	0.6827
24	0.6827	0.6980	0.6807	0.6847	0.6907	0.6860	0.6813	0.6833	0.6693
25	0.6647	0.6980	0.6753	0.6673	0.6880	0.6860	0.6760	0.6720	0.6667
26	0.6793	0.6953	0.6847	0.6827	0.6807	0.6767	0.6747	0.6840	0.6873
27	0.6593	0.7020	0.6773	0.6707	0.6807	0.6840	0.6840	0.6747	0.6687
28	0.6853	0.7033	0.6780	0.6827	0.6753	0.6753	0.6947	0.6787	0.6787
29	0.6680	0.7100	0.6807	0.6740	0.6767	0.6580	0.6853	0.6833	0.6840
30	0.6793	0.7040	0.6927	0.6807	0.6753	0.6813	0.6920	0.6847	0.6940

Yöntem bölümünde de belirtildiği üzere kNN algoritmasının performansı en yakın k komşu sayısı ve mesafe metriğine doğrudan bağlıdır. Bundan dolayı kNN ile en iyi performansı elde edebilmek için değişen k değerleri ile farklı mesafe metrikleri eşzamanlı olarak analiz edilmiştir. k değeri 1'den başlayıp 30'a kadar 1'er artırılarak Bray-Curtis, Canberra, Chebyshev, Manhattan, korelasyon, kosinüs, Öklid, Minkowski ve kare Öklid mesafe ölçütleri için elde edilen analiz sonuçları Şekil 2'de ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'den de görüleceği üzere, her bir mesafe metriği için k değerinin ardışık olarak artırılması birbirinden farklı doğruluk sonuçları üretmektedir. Örneğin,

Şekil 2(a)'dan Bray-Curtis mesafe metriğinde $k = 18$ için en yüksek doğruluk (0.6900) elde edilirken Şekil 2 (e)'den korelasyon mesafe metriğinde $k = 12$ için en yüksek doğruluk (0.7253) elde edilmektedir. Benzer şekilde Şekil 2 (c)'den Chebyshev mesafe metriğinde $k = 30$ için en yüksek doğruluk (0.6927) elde edilirken Şekil 2 (f)'den kosinüs mesafe metriğinde $k = 12$ için en yüksek doğruluk (0.7200) elde edilmektedir. Benzer şekilde Tablo 2'de her k değerinde en yüksek performans değerlerinin elde edildiği mesafe metriği sonuçları koyu ile belirtilmiştir. Tablo 2'den de görüleceği üzere Canberra mesafe metriği k 'nın 14, 16-23 değerleri haricindeki tüm değerlerinde en yüksek sonuçları

vermiştir. Belirtilen k değerlerinde ise ya ikinci en iyi performansı elde etmiş ya da en iyi performansa oldukça yakın değerler üretmiştir. Sonuç olarak, Şekil 2 ve Tablo 2'den de görüleceği üzere kNN algoritmasının performansı k sayısına oldukça bağlıdır. Ancak, algoritmanın daha hızlı çalışması ve daha az bellek tüketmesi açısından en yüksek performansa oldukça yakın sonuçlar üreten en küçük k değerinin seçilmesi önemlidir. Gerçekleştirilen bu kapsamlı analiz sonucunda, en yüksek doğruluk oranının (0.7800) elde edildiği $k = 9$ ve Canberra mesafe metriğinin mesane kanserinin derecelendirmesinde uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Mesane karsinomunun derecelendirilmesinde kullanılan makine öğrenim tabanlı yöntemlere ait sonuçlar ve bu sonuçların hangi parametrelerle elde edildiği Tablo 3'te verilmiştir. Her bir performans metriği için en iyi sonucu üreten algoritma daha koyu gösterilmiştir. En iyi sonuçlar kesinlik metriği hariç karar ağacı algoritmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 3. Karşılaştırılan makine öğrenmesi metodlarıyla elde edilen en iyi performans sonuçları
(Best performance results obtained with the benchmarked machine learning methods)

Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik	F1-skoru
Naive Bayes	0.6580	0.6653	0.8132	0.7223
kNN Canberra, $k = 9$	0.7800	0.9153	0.8023	0,8510
Karar ağacı max_depth = 2 min_samples_split = 15	0.8220	0.9752	0.8082	0.88224

Tablo 3'ten de görüleceği üzere, karar ağacı algoritmasının doğruluğu (0.8220) Naive Bayes algoritmasından (0.6580) ve kNN algoritmasından (0.7800) sırasıyla %25 ve %5 daha yüksektir. Benzer şekilde karar ağacı algoritması, duyarlılık ve F1-skoru değerleri açısından da en yüksek sonuçları üretmiştir. Ancak karar ağacı algoritmasının kesinlik değeri (0.8082) Naive Bayes algoritmasının kesinlik (0.8132) değerinden yaklaşık %1 daha düşük hesaplanmıştır. Sonuç olarak, karar ağacı algoritmasının TCGA verilerinden mesane kanserinin derecelendirilmesinde patoloğa yardımcı olmak için kullanılabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, hematoksilen eozin ile boyanmış idrar kesesi doku örneklerinin tam slayt tarayıcı görüntülerinden mesane ürotelyal karsinom derecelendirmesini belirlemek için üç farklı makine öğrenim tabanlı algoritma (Naive Bayes, kNN ve karar ağacı) uygulanmış ve mesane kanseri derecelendirmesindeki performansları kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. En yüksek performansı elde etmek için her bir algoritmanın hiperparametreleri belirli bir aralıkta ızgara araması yapılarak optimal değeri belirlenmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçların daha güvenilir ve sağlam olması için K-katlı çapraz doğrulama ($K = 5$, *iterasyon* =

10 ile) uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre en yüksek performans %82 doğruluk ile karar ağacı algoritmasından elde edilmiştir. Bu sonuç, karar ağacı algoritmasının mesane kanserinin derecesini belirlemede patoloğa yardımcı olmak için kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmaları kapsamında mesane ürotelyal karsinomuna ait tüm slayt tarama görüntülerinden farklı öznelikler çıkartılarak mevcut algoritmaların performansı daha da artırılabilir. Ayrıca diğer makine öğrenim tabanlı algoritmalar ile birlikte farklı kanser türlerinin derecelendirmesi gerçekleştirilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ali DEĞİRMENCİ, İlyas ÇANKAYA, Ömer KARAL ve Berrak GÜMÜŞKAYA: Çalışmanın derlenmesi ve yazımını birlikte yapmışlardır.

Ayrıca yazarlar makalenin tamamını tartışmış ve son halini onaylamışlardır.

Ali DEĞİRMENCİ, İlyas ÇANKAYA, Ömer KARAL ve Berrak GÜMÜŞKAYA compiled and wrote the manuscript together. The authors also discussed and approved the final version 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] Oosterlinck W, Lobel B, Jakse G, Malmström PU, Stöckle M, Sternberg C. EAU Working Group on Oncological Urology. Guidelines on bladder cancer, European urology. 2002; 41: 105-112.
- [2] American Cancer Society. Cancer Facts & Figures. 2022.
- [3] Degirmenci A, Karal O. Robust Incremental Outlier Detection Approach Based on a New Metric in Data Streams. IEEE Access, 2021; 9: 160347-160360.
- [4] Degirmenci A, Karal O. Efficient density and cluster based incremental outlier detection in data streams. Information Sciences. 2022; 607: 901-920.
- [5] Apaydin M, Yumus M, Degirmenci A, Kesikburun S, Karal O. Deep Convolutional Neural Networks Using U-Net for Automatic Intervertebral Disc Segmentation in Axial MRI. In 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2022.
- [6] Esen F, Degirmenci A, Karal O. Implementation of the Object Detection Algorithm (YOLOV3) on FPGA. In 2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2021.
- [7] Karal O. Robust and optimal epsilon-insensitive Kernel-based regression for general noise models. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023; 120: 105841.
- [8] Fuster S, Khoraminia F, Kiraz U, Kanwal N, Kvikstad V, Eftestøl T. ... Engan K. Invasive cancerous area detection in Non-Muscle invasive bladder cancer whole slide images. In 2022 IEEE 14th Image, Video, and Multidimensional Signal Processing Workshop (IVMSP). 2022; 1-5.
- [9] Khosravi P, Kazemi E, Imielinski M, Elemento O, Hajirasouliha I. Deep convolutional neural networks enable discrimination of heterogeneous digital pathology images. EBioMedicine, 2018; 27: 317-328.
- [10] Yin PN, Kc K, Wei S, Yu Q, Li R, Haake A.R, ... Cui F. Histopathological distinction of non-invasive and invasive bladder cancers using machine learning approaches. BMC medical informatics and decision making. 2020; 20: 1-11.
- [11] Jansen I, Lucas M, Bosschieter J, de Boer OJ, Meijer SL, van Leeuwen TG, ... Savci-Heijink CD. Automated detection and grading of non-muscle-invasive urothelial cell carcinoma of the bladder. The American journal of pathology. 2020; 190: 1483-1490.
- [12] Woerl AC, Eckstein M, Geiger J, Wagner DC, Daher T, Stenzel P, ... Foersch S. Deep learning predicts molecular subtype of muscle-invasive bladder cancer from conventional histopathological slides. European urology. 2020; 78: 256-264.
- [13] Chen S, Jiang L, Zheng X, Shao J, Wang T, Zhang E, ... Zheng J. Clinical use of machine learning-based pathomics signature for diagnosis and survival prediction of bladder cancer. Cancer science. 2021; 112: 2905-2914.
- [14] Lucas M, Jansen I, van Leeuwen TG, Oddens JR, de Bruin DM, Marquering HA. Deep learning-based recurrence prediction in patients with non-muscle-invasive bladder cancer. European Urology Focus. 2020.
- [15] Tokuyama N, Saito A, Muraoka R, Matsubara S, Hashimoto T, Satake N, ... Ohno Y. Prediction of non-muscle invasive bladder cancer recurrence using machine learning of quantitative nuclear features. Modern Pathology. 2022; 35: 533-538.
- [16] Bhambhvani HP, Zamora A, Shkolyar E, Prado K, Greenberg DR, Kasman AM, ... Shah JB. Development of robust artificial neural networks for prediction of 5-year survival in bladder cancer. In Urologic Oncology: Seminars and Original Investigations, 2021; 39: 193-e7.
- [17] Song Q, Seigne JD, Schned AR, Kelsey KT, Karagas MR, Hassanpour S. A machine learning approach for long-term prognosis of bladder cancer based on clinical and molecular features. AMIA Summits on Translational Science Proceedings. 2020.
- [18] Zheng Q, Yang R, Ni X, Yang S, Xiong L, Yan D, ... Liu X. Accurate Diagnosis and Survival Prediction of Bladder Cancer Using Deep Learning on Histological Slides. Cancers. 2022; 14: 5807.
- [19] Zheng Q, Jiang Z, Ni X, Yang S, Jiao P, Wu J, ... Liu X. Machine Learning Quantified Tumor-Stroma Ratio Is an Independent Prognosticator

- in Muscle-Invasive Bladder Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24: 2746.
- [20] Değirmenci A. Computer Based Grading of Bladder Carcinoma. Yüksek lisans tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2017.
- [21] Hatipoğlu Ş, Belgrat MA, Degirmenci A, Karal Ö. Prediction of Unemployment Rates in Turkey by k-Nearest Neighbor Regression Analysis. In 2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2022.
- [22] APAYDIN M, Yumuş M, Değirmenci A, Karal Ö. Evaluation of air temperature with machine learning regression methods using Seoul City meteorological data. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2022; 28: 737-747.
- [23] Degirmenci A, Karal O. iMCOD: Incremental multi-class outlier detection model in data streams. *Knowledge-Based Systems*. 2022; 258: 109950.
- [24] Ozaslan IN, Degirmenci A, Karal O. Tourism Demand Forecasting for Turkey by Using Adaboost Algorithm. In 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2022.



The Effect of Vertical Skylights Designed in Buildings on Daylight Illumination

Yaren Dilara ERDEM¹ , Şule YILMAZ ERTEN¹ , Filiz UMAROĞULLARI¹ 

¹Trakya University, Architectural Faculty, Department of Architecture, Edirne, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/03/2023
Revision: 11/05/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

Daylighting
Vertical Skylights
DesignBuilder

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/03/2023
Düzeltilme: 11/05/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Günlük Aydınlatması
Düşey Işıklıklar
DesignBuilder

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In the study, the size, location and height of vertical skylights, which are important factors in daylight lighting, are observed over the effect of lighting frames according to floors, through current regulatory rules and lighting standards. It has been observed that vertical skylights are more efficient in low-rise buildings, while in multi-storey buildings, it is efficient at the top floor levels, and the consumption of efficiency is observed as you go down to the lower floors. / Çalışmada bitişik nizam yapıların günlük aydınlatmasında önemli bir faktör olan düşey ışıklıkların büyüklükleri, konumu ve yüksekliklerinin katlara göre aydınlanma düzeylerinin etkisi güncel yönetmelik kuralları ve aydınlatma standartları üzerinden incelenmiştir. Az katlı yapılarda düşey ışıklıkların daha verimli olduğu, çok katlılarda ise en üst kat düzeylerinde verimli olup alt katlara inildikçe verimin azaldığı gözlemlenmiştir.

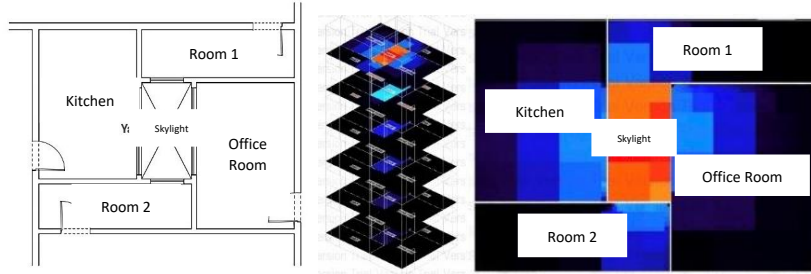


Figure A: Simulation inputs and outputs /Şekil A: Simülasyon girdi ve çıktıları

Highlights (Önemli noktalar)

- Düşey ışıklıkların büyüklükleri kadar kaç katlı bir yapıya hizmet ettikleri de önemlidir/ The size of the vertical skylights is as important as how many floors they serve..
- Kat sayısı arttıkça yalnızca ışıklıkların büyüklüğünün artması yeterli olmamaktadır/As the number of floors increases, it is not sufficient to increase the size of the skylights alone.
- Işıklıklar tek katlı bir yapıda verimli, ancak çok katlı yapılarda üst katlardan alt katlara inildikçe verimi azalmaktadır/ Skylights are efficient in a single-storey structure, but in multi-storey structures, their efficiency decreases as you go from the upper floors to the lower floors.

Aim (Amaç): It is the measurement of the efficiency of the vertical skylights according to the floors, where the spaces that do not have a window to the façade in adjacent buildings benefit from daylight lighting / Bitişik nizam yapılarda cepheye penceresi olmayan mekanların günlük aydınlatmasından faydalandığı düşey ışıklıkların katlara göre veriminin ölçülmesidir.

Originality (Özgünlük): Addressing the skylight rules within the scope of the current zoning law shows that the result of the study can guide the current rules / Günümüzde geçerli imar kanunu kapsamındaki ışıklık kurallarının ele alınması çalışmanın sonucunun güncel kurallara yön verebileceğini göstermektedir.

Results (Bulgular): Skylights are efficient in a single-storey structure, but in multi-storey structures, their efficiency decreases as you go from the upper floors to the lower floors / Işıklıklar tek katlı bir yapıda verimli, ancak çok katlı yapılarda üst katlardan alt katlara inildikçe verimi azalmaktadır.

Conclusion (Sonuç): In order for the skylights to reach the lower floors efficiently, they should be covered with reflective surfaces and the size of the windows opening to the skylights should be taken into consideration / Işıklıkların günlük aydınlatmasını alt katlara verimli ulaştırabilmesi için yansıtıcı yüzeylerle kaplanması, ışıklıklara açılan pencere büyüklüklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



The Effect of Vertical Skylights Designed in Buildings on Daylight Illumination

Yaren Dilara ERDEM¹ , Şule YILMAZ ERTEN¹ , Filiz UMAROĞULLARI¹ 

^{1,2,3}Trakya University, Architectural Faculty, Department of Architecture, Edirne, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/03/2023
Revision: 11/05/2023
Accepted: 18/05/2023

Keywords

Daylighting
Vertical Skylights
DesignBuilder

The fact that lighting plays an important role in the energy consumed by buildings, which have a large share in the total energy consumption in the world, requires more work to be done on daylight, which reduces the need for artificial lighting, saves energy in buildings and increases indoor comfort as well. Whether the current energy resources will exist in the future and the extent of the damage to the ecosystem as a result of the deterioration of the natural balance are discussed and discussed from different perspectives. At this point, with the thought of efficient use of energy, studies are carried out to reduce energy consumption and ensure sustainability in the field of lighting. In the building sector, which has a significant share in energy consumption, energy efficient design and sustainable architecture, which aims to use renewable energy sources and reduce energy consumption, are supported by planning and design criteria.

In this study, the efficiency of skylights, which is one of the lighting methods with daylight, was investigated in accordance with the criteria specified in the relevant zoning legislation and the daylight standard in buildings. The effect of skylights on visual comfort and daylight performance in residential interiors that do not receive direct sunlight was analyzed with 3 different scenarios on spaces in different directions and floors with the help of the Design Builder simulation program. As a result of the analysis, it was concluded that the size of the spaces illuminated by the skylight, the length of the facade where the skylight is located, the floor where the space is located and its direction significantly affect the level of illumination. In line with the findings obtained in the study, it has been observed that the minimum skylight values given in the Planned Areas Zoning Regulation in force today do not provide sufficient daylight illumination, especially in the spaces on the ground floor. For this reason, solutions have been proposed to reach the level of visual comfort in spaces.

Binalarda Tasarlanan Düşey Işıklıkların Güneşli Aydınlatmasına Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/03/2023
Düzeltilme: 11/05/2023
Kabul: 18/05/2023

Anahtar Kelimeler

Güneşli Aydınlatması
Düşey Işıklıklar
DesignBuilder

Öz

Dünyadaki toplam enerji tüketiminde büyük bir paya sahip olan binaların, tükettiği enerjide aydınlatmanın önemli rol oynaması, yapay aydınlatma ihtiyacını azaltarak, binalarda enerji tasarrufu sağlayan ve bunların yanı sıra iç mekân konforunu artıran güneşli ile ilgili daha çok çalışmanın yapılmasını gerektirmektedir. Günümüzde sahip olunan enerji kaynaklarının gelecekte var olup olmayacağı, doğal dengenin bozulması sonucu ekosistemin göreceği zararın boyutu farklı bakış açıları ile ele alınmakta ve tartışılmaktadır. Bu noktada enerjinin verimli kullanımı düşüncesiyle aydınlatma alanında da enerji tüketimini azaltmaya ve sürdürülebilirliği sağlamaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan yapı sektöründe ise yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmayı ve enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen enerji etkin tasarım ve sürdürülebilir mimarlık anlayışı, planlama ve tasarım kriterleri ile desteklenmektedir. Bu çalışmada güneşli ile aydınlatma yöntemlerinden birisi olan ışıklıkların ilgili imar mevzuatı ile binalarda güneşli standardında belirtilen ölçütler doğrultusundaki verimliliğinin araştırılmıştır. Doğrudan güneşli almayan konut iç mekânlarındaki ışıklıkların, görsel konfor ve güneşli performansına etkisi Design Builder simülasyon programı yardımıyla farklı yön ve katlardaki mekânlar üzerinde 3 farklı senaryo ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda ışıklık ile aydınlatılan mekânların büyüklüğü, ışıklığın bulunduğu cephenin uzunluğu, mekânın bulunduğu kat ile yönünün aydınlık düzeyini etkilediği sonucuna varılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, günümüzde yürürlükte olan Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'nde verilen minimum ışıklık değerlerinin özellikle zemin kattaki mekânlarda yeterli güneşli aydınlanması sağlamadığı görülmüştür. Bu sebeple mekânlarda görsel konfor düzeyine ulaşmak için çözüm önerileri getirilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Rapid population growth and urbanization have led to an increase in energy demand and a concomitant depletion of energy resources. As a result, the concept of sustainability, defined as handing over to future generations through efficient use of existing energy resources, has emerged and studies have been initiated to protect energy resources and reduce energy consumption in all sectors. In the building sector, which accounts for about 40% of total energy consumption, this situation has found far-reaching effects, and approaches such as sustainable architecture and energy-efficient design have emerged [1]. If we examine the energy consumption in buildings, which account for a significant amount of energy consumption, we find that the energy consumption due to lighting is about 28% [2]. For this reason, it is important to conduct lighting-specific studies to reduce the energy consumption caused by artificial lighting in terms of sustainable architecture and energy-efficient design. At this point, daylight, which is the most basic energy source, plays the most effective role for lighting. While the effects of daylight on people and the quality of the indoor environment are shared in the studies, the importance of daylight-efficient design is increasing. This is because it is well known that increased use of daylight not only provides sustainability and energy efficiency in buildings, but also increases the performance and visual comfort of individuals. [3, 4, 5]. Nowadays, in order to design sustainable and energy efficient buildings, many programs have been developed to calculate the energy and daylighting performance of buildings, energy consumption, and the daylighting percentage of spaces. In this way, one can get an idea of the energy efficiency of the buildings before they are put into service. In this study, the effect of skylights, which are one of the methods of incorporating daylight into buildings, on indoor visual comfort and daylight performance was investigated. In this context, the concept of lighting in sustainable architecture and energy-efficient design is discussed, and the effects of daylight on space are discussed. The zoning ordinance was evaluated against daylighting standards in buildings by measuring the amount of daylight and the performance provided to spaces using the variables of the number of stories of skylights with the minimum values of the zoning ordinance. The DesignBuilder program was used in the study for this evaluation, and suggestions for adequate daylighting and visual comfort were made as a result of the study.

1.1. Literature Review (Literatür araştırması)

Arpacioğlu et al [6] and Arpacioğlu [7], who studied the effects of daylight on visual comfort and space, concluded that daylight is a factor that increases space quality and comfort. However, in a study that examined the effects of daylight on psychological comfort [8], psychological comfort was found to be related to lighting prescriptions. The effects of daylight on work comfort are also frequently the subject of research. In a study that measured the effect of daylight illuminance on the stress levels of hospital employees [9], employees with daylight illuminance levels below the average illuminance (700 lx) but above the average had medium and high stress levels, while above the average illuminance (1000-1500 lx) this ratio was found to decrease. In addition, daylighting, which contributes positively to the reduction of electrical energy consumption, has also been the subject of numerous studies on energy efficient and effective design [10, 11, 12]. The literature includes studies that address energy-efficient lighting systems [13] and sustainable lighting designs for educational buildings [14]. Studies on luminaires, which are the direct subject of the study, are also common in the literature. In addition to the studies that simulate and measure the daylight levels provided by the types of skylights for the space [15], there are also studies that determine the optimal size, height/width ratio, and reflectance ratios of these skylights [16]. In addition, there are also studies that show the positive contribution of the skylight in reducing the energy consumption for lighting and developing cost-effective solutions. The effect of a skylight element on energy and daylight performance has been investigated with different design criteria [17]. In another study, it was suggested to use skylights with a 4-10% skylight opening, which can increase daylighting without affecting energy consumption [18]. In a study investigating the direct effect of skylight type on energy consumption, it was found that the energy consumption of a commercial building can be reduced by 0.8% to 14% and the lighting energy consumption can be reduced by 30% by using different skylight configurations [19]. In another study investigating the study of the energy and economic performance of skylights in different climates showed that in areas with mild climates, identical buildings in four different cities (Caribou, Maine, Miami, Florida) can save more energy and costs than in regions with severe winters [20]. Various studies in the literature have used different simulation programs that have evaluated the different impacts of skylights. There are studies that use program extensions such as the Lightscape program or Honeybee-Ladybug, an extension of the

Grasshopper program, and Lighttools, an extension of the Solidworks program, for the effects of different design factors on the daylight values of skylights [15, 16, 17, 21]. The Design builder program, based on EnergyPlus, is used for the effects of skylight on energy and daylight performance [19]. Programs such as Dialux and Radiance have been used for pure illuminance measurements [22, 10]. In the literature search, no study was found that investigated the effect of a standard size skylight, which was created in accordance with zoning regulations for planned areas, under the climatic conditions of Turkey on different floors of the houses. In this study, the daylight comfort conditions in residential houses are evaluated using DesignBuilder simulation program.

1.2. Methodology

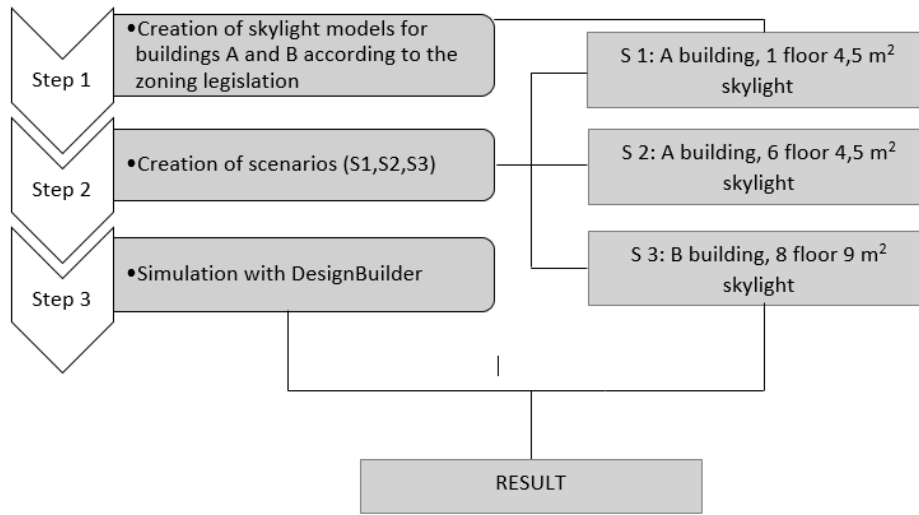


Figure 1. The method of the study (Çalışmanın yöntemi)

In the study, the skylights and surrounding spaces were modeled using Design Builder, the number of stories was increased while the skylight remained the same for Building A, and the effect of skylight size on the maximum story height for Building B was investigated. In the simulation with Design Builder, the daylight level and performance in the rooms in the single-story building were measured in the first scenario. In the second scenario, the daylight level and performance were calculated on the first floor of the 6-story building, which is the building code limit. In the third scenario, the daylight level and performance in the first floor spaces of the 8-story building were calculated by increasing the size of the skylights.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, which aims to investigate the effect of vertical skylights in buildings on indoor visual comfort and daylighting performance, the dimensions of the skylight space and the created floor plan areas were kept stable and the number of floors was set as a variable. In determining the size of the skylight space, the limits of the zoning ordinance [23] were taken into account. TS EN for the necessary criterion of the target illuminance at the place of measurement, the standard 17037 Daylighting in Buildings [24] was used. In the corresponding standard, the daylight factor method is specified as minimum 300 lx, average 500 lx, high 750 lx in the daylight power limitation for horizontal openings (skylights). In this study, two different floor plan types were created in accordance with the limits of the zoning ordinance and tested with three different scenarios (Figure 1).

2.1. Daylight and Visual Comfort (Günişliği ve Görsel Konfor)

Daylight, which affects both the physiological and psychological health of people and work performance, is the most important element that increases the quality of space and provides visual comfort. It is a phenomenon that maintains its importance as it reduces energy consumption in buildings and affects sustainability. One of the most important effects of daylight on human health is that it is an effective stimulant for the human visual system and the circadian cycle, that is, the biological alternation or rhythm of behavior. A lack of daylight leads to psychological problems such as depression, nervous fatigue, eyestrain or mood swings, as well as physiological problems such as insomnia, excessive sleep, disruption

of the circadian cycle, increase in the risk of diabetes and some cancers [25]. In one study, daylight was found to be the fourth most important factor among the nine factors affecting human health after sleep, ventilation, and nutrition [26]. Another study states that about 15% of the world's population suffers from seasonal mood changes that are due to sunlight [27]. However, it is also known that daylight enhances human performance and increases motivation and productivity. In many studies, it has been found that a cloudy day or poor lighting conditions affect people's energy levels and reduce their work performance. In one of these studies, it was concluded that daylight, when used effectively and properly, can improve mental functions by 10 to 25%, including memory and work speed, and increase productivity by up to 15% [28]. The proper and effective use of daylight plays an important role in reducing energy consumption and ensuring sustainability on a global scale. This is because buildings account for about 40% of the total energy consumption in the world. In Turkey, this share is 45%. While 20% of the total electrical energy consumed is used for lighting purposes, this percentage is 56% in buildings [29]. By using daylight, the need for artificial lighting can be reduced, and energy costs can be lowered by reducing the amount of energy consumed. In addition to the physical and mental effects of daylight on people, it enhances the quality of space and provides visual comfort. Visual comfort is a subjective assessment of how well the eye sees and correctly perceives objects, their color, shape and texture, in short, the quality of light. To ensure visual comfort at work, there should be conditions such as the provision of the required level of lighting, the absence of glare and dazzle, and the choice of a color suitable for the function. In summary, the proper and effective use of daylight enables people to increase their energy level and motivation and, accordingly, increase their performance, be physically and mentally healthy, and reduce energy consumption by reducing the need for artificial lighting. The fact that lighting accounts for a significant proportion of energy consumption in homes has led to this study being conducted specifically for homes. Thus, the study was accompanied by a simulation program and spatial lighting analyzes to investigate the specific effects of daylight use on spaces.

2.2. Case Study: Measuring the Effect of Vertical Lights on Indoor Daylight Performance (Alan Çalışması: Düşey Işıklıkların İç Ortam Günışığı Performansına Etkisinin Ölçülmesi)

In this part of the study, the vertical skylights, which are one of the methods of integrating daylight into the building, are considered as the problem of building facades, that is, skylights and so on. Istanbul, which is a temperate climate region where these methods are commonly used and the population and building density is high, is discussed. In this direction, a partial apartment plan was prepared, keeping the dimensions of the rooms stable and setting the number of floors as variable. Accordingly, the daylight illuminance levels entering the rooms through the skylight were calculated. In the area of skylights and data analysis by floor, the data obtained in the study were included and the data were analyzed according to the standard TS EN 17037 Daylight in Buildings.

5.1. Indoor Skylight Criteria (İç Ortam Işıklık Kriterleri)

The boundaries of the indoor skylight space are defined by the zoning ordinance. According to the zoning ordinance, skylight defines "the spaces covered with transparent building materials created to illuminate the main staircase or landing of the building or the games without facade". In this study, the limits of skylights in the zoning ordinance were considered. According to the values in Article 32 of the relevant ordinance, skylights in buildings with 1 to 6 floors have a narrow side of at least 1.50 m and an area of 4.50 m². It should be 9.00 m². In addition, according to the regulation, a maximum of four games can benefit from a skylight with minimum size per floor. For this reason, in the study, the floor numbers 1 and 6 were set as the minimum and maximum floor distances for the 4.5 m² skylight, while the area for the 9 m² skylight was set at 8 floors and the analyzes were performed for these floor numbers. In the floor plan design, four rooms were created to benefit from the skylight. The windows in the skylight room were selected in accordance with the Regulation on the Energy Performance of Buildings and the standards of the Turkish Standards Institute. The EnergyPlus-based simulation program Design Builder, which was used in the study, made it possible to draw various conclusions by performing analyzes between building design alternatives using performance and function-based comparison methods [30]. In the DesignBuilder program, the analysis results can be obtained by entering data such as location and climate data of the building, zoning of areas within the building, activity of the zones and user profile, selection of wall, floor and roof materials, and thermal transmittance coefficients.

5.2. Simulation with Designbuilder of Skylights in the Interior (İç ortam Düşey Işıklıkların DesignBuilder ile Simülasyonu)

As an example for the study, a partial apartment floor plan with a floor height of 3.5 m is designed, consisting of four rooms that can receive daylight only through the skylight (Figure 2 and Figure 3). To better analyze the value differences in the study, scenarios with building A with 1 and 6 floors and the scenario with floor plan B with 8 floors are discussed (Figure 4). There are also differences in the size of the space between buildings A and B due to the size of the skylights. Since the size of the space does not change in this case, Scenarios 1 and

2 are comparable for Building A, and Building B is evaluated on its own. In addition, the preferred materials and the thickness, density, and thermal conductivity values of the materials were entered into the DesignBuilder program for analysis. It was found that natural gas and radiator heating systems as heating systems and natural ventilation without mechanical solutions for cooling provide thermal comfort. For the comfort zone of the modeled building, 18-22°C was chosen for heating comfort and 28-34°C for cooling comfort.

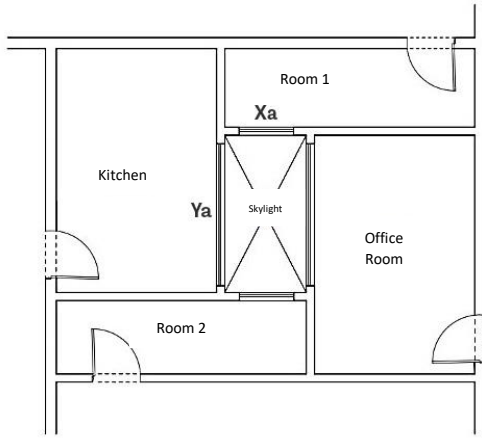


Figure 2. Partial plan sketch of building A (A Binasının Kısmi Planı)

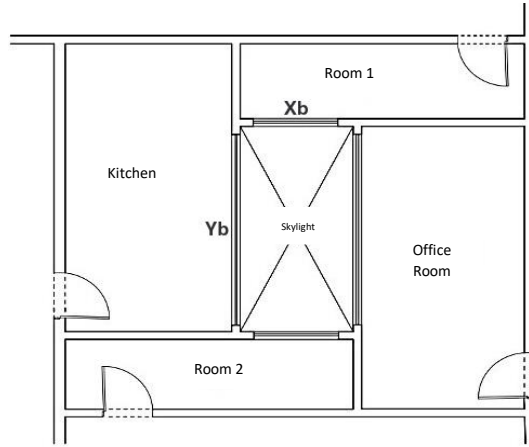


Figure 3. Partial plan sketch of building B (B Binasının Kısmi Planı)

The direction for each space, the size of the space, and the window size used are given in Table 1. The

floor height has been determined as 3.50 m in buildings A and B for each space.

Table 1. Information about spaces in scenarios (Senaryodaki Odalar Hakkındaki Bilgiler)

District	Direction of light	Scenerio 1		Scenerio 2		Scenerio 3	
		Space Size	Window Size	Space Size	Window Size	Space Size	Window Size
Kitchen	East	15,5m ²	270x200cm	15,5m ²	270x200cm	19,0m ²	430x200cm
Room	South	7,8m ²	130x200cm	7,8m ²	130x200cm	8,0m ²	180x200cm
Office	West	15,5m ²	270x200cm	15,5m ²	270x200cm	19,0m ²	430x200cm
Room	North	7,8m ²	130x200cm	7,8m ²	130x200cm	8,0m ²	180x200cm

In addition, the spaces where floor heights and skylight spaces are evaluated in the section for Buildings A and B are shown in Figure 4.

The results of the analyzes performed based on the above information are discussed in the next section.

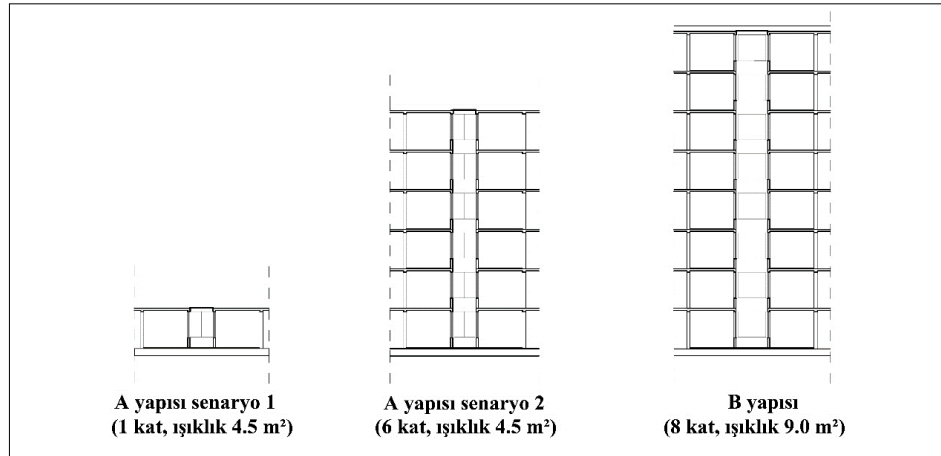


Figure 4. The sections of building A and building B (A binası ve B binasının bölümleri)

3.RESULTS (BULGULAR)

In the analyzes performed, the distribution of illuminance levels in the floor plan of Scenario 1 in Building A is shown according to the color scale in Figure 5. From this it can be seen that the illuminance of daylight supplied to the rooms from

the skylight, about half of the volume of each room, meets the relevant standard (Figure 5). It can be seen that the illuminance in front of the windows of the building reaches up to 920 lux, which is the maximum value of daylight illuminance.

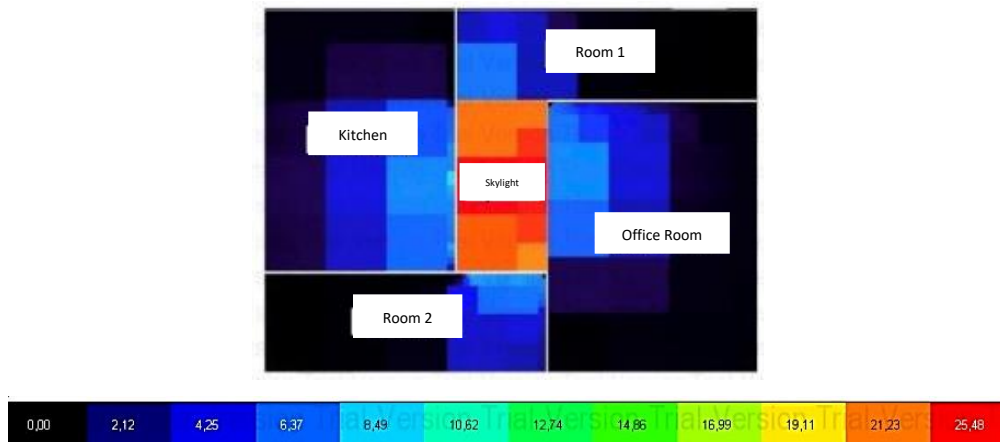


Figure 5. Building A scenario 1, daylight analysis in plan (Senaryo 1, A binasının günışığı aydınlatma analizi)

On the other hand, as the spaces move away from the skylight, areas where the minimum illuminance level decreases to approximately 5 lux were observed, and it was observed that in scenario 1, although the building was a single storey, sufficient illumination level could not be provided on the ground floor. This situation is especially related to direction, depth of space and window area. In the planning, the kitchen and room 2 are located on the north and derivative facades, while the office room and room 1 are located on the south and derivative

facades. On the other hand, since the spaces can only be illuminated from the window opened in the skylight, this evaluation will be based on the direction in which the illumination can be provided. However, there is a 1x2 size difference between the window sizes of the kitchen and room 2 (Table 2). The difference between the minimum illuminance levels of the kitchen and room 2 can be said to be related to the presence of areas farther away from the skylight, since the m2 of the kitchen is larger than that of room 2. Similarly, there is the same relationship between office room and room 1.

Table 2. Simulation outputs for building A scenario 1 (A binası için simülasyon çıktıları)

District	Minimum Daylight Level (%)	Maksimum Daylight Level (%)	Minimum Illuminance Level (lux)	Maksimum Illuminance Level (lux)
Kitchen	0,047	7,762	4,68	775,95
Room 2	0,116	5,906	11,62	591,09
Skylight	20,111	25,021	2011,18	2502,16
Office Room	0,083	6,234	8,26	623,30
Room 1	0,137	9,210	13,73	920,89

When the results of Scenario 2 in building A are examined, it has been determined that the daylight illuminance level on the ground floor in the 6-storey building is well below the values given in the standard, and there are dark spots with values of 0.26 lx, 0.10 lx and 0.14 lx, where daylight does not

reach in the areas far from the skylight (Fig. 6 and Table 3). In the color scale of the simulation outputs given in Figure 6, the dark parts where the light cannot reach show that the relevant standard cannot be achieved in all of the spaces.

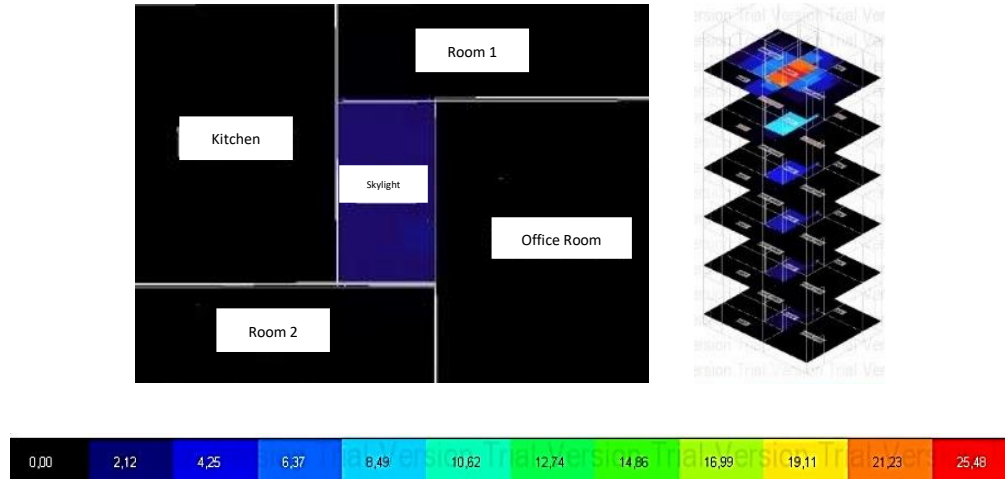


Figure 6. Building A scenario 2 daylight analysis in plan (Senaryo 2 için A Binasının plandaki Günışığı Analizi)

Figure 7. Building A scenario 2 daylight analysis in section (Senaryo 2 için A Binasının Kesitteki Günışığı Analizi)

The fact that all the data of scenario 1 and scenario 2 are stable and only the number of floors are different explains the difference in illuminance values in building A and building B. In the 1st scenario, the ground floor of the single-storey building has an illuminance level of 920 lx above the standard value. It is known that it can show its effect at a maximum depth of 6m. The same situation can be seen vertically, with a height

difference of 17.5 m (3.5 m x 5 floors) between the top floor and the ground floor of the surface where the light can be received. In this case, it is seen that the illuminance levels at every point of the spaces remain below the relevant standard, regardless of which direction they are located.

Table 3. Simulation results for building A scenario 2 (A senaryosu 2 oluşturmak için simülasyon sonuçları)

District	Minimum Daylight Level (%)	Maksimum Daylight Level (%)	Minimum Illuminance Level (lux)	Maksimum Illuminance Level (lux)
Kitchen	0,003	0,189	0,26	17,88
Room 2	0,001	0,122	0,10	11,52
Skylight	2,166	2,578	204,97	243,98
Office Room	0,002	0,108	0,21	10,27
Room 1	0,001	0,307	0,10	29,12

The simulation outputs of the illuminance levels in the 8-storey building, which is considered as Scenario 3 in the study for the building B, are given in Figure 7 and Figure 8. Accordingly, it has been observed that the daylight illuminance levels

provided to the spaces from the 9.00 m² skylight on the ground floor are 348 lx. This value is almost the minimum value of the standard. As in the other 2 scenarios, it is seen that there are dark spots where daylight does not reach in the 3rd scenario.

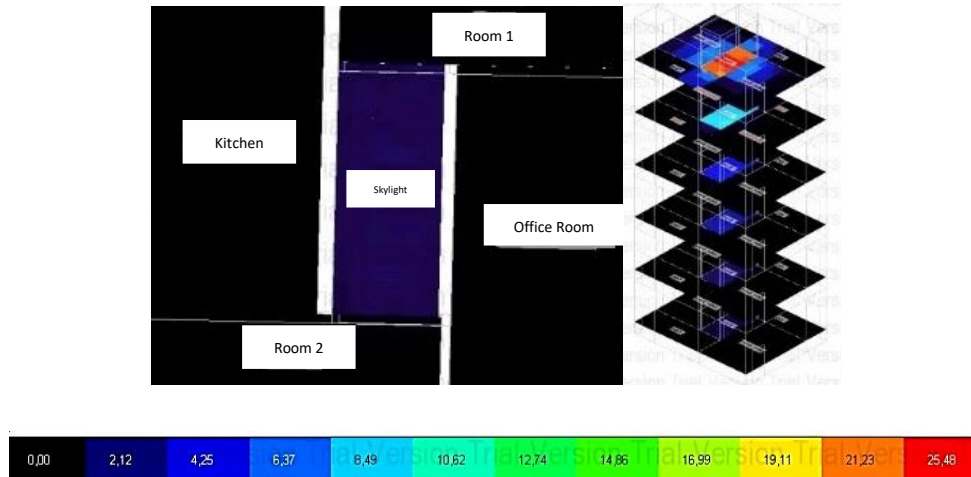


Figure 8. Daylight analysis in plan B building (B planı binasında gün ışığı analizi) **Figure 9.** Daylight analysis in section B building (B bölümündeki binada gün ışığı analizi)

Building B has a skylight twice the size of Building A and has 8 stories. While the window heights of the rooms arranged around the 9 m² skylight are the same, the window widths are about 1.5 times larger than those of Building A. In this case, although the illuminance to be extracted is greater, the number of floors increases, so the height distance required to

reach the illuminance also increases (3.5 m x 8). It can be seen that the maximum illuminance levels on the first floor of building B have values close to the limit of the daylighting standard (329-348 lux) or below the standard (51-167 lux) (Figure 8 and Figure 9, Table 4).

Table 4. Simulation results of building B (B binasının simülasyon sonuçları)

District	Minimum Daylight Level (%)	Maksimum Daylight Level (%)	Minimum Illuminance Level (lux)	Maksimum Illuminance Level (lux)
Kitchen	0,005	0,055	4,76	51,88
Room 2	0,002	0,371	1,46	348,44
Skylight	2,077	3,033	1951,66	2849,96
Office Room	0,004	0,178	3,38	167,10
Room 1	0,001	0,350	1,13	329,10

However, if we look at the directions in which the rooms are located, we find that the kitchen and room 2, which can be illuminated from the east and north directions in building B, are more illuminated than the office room and room 1, which can be illuminated from the west and south directions. The diagram comparing the illuminance levels of all 3 scenarios is shown below (Figure 10). Although the rooms designed as kitchens and offices have the

same dimensions and window areas, different results were obtained depending on the location of the rooms. It can be seen that for the standard CIE (International Commission on Illumination) [31], when the sky is cloudy, the kitchen, which is illuminated from the east, has an illuminance 20% higher than the study, which is illuminated from the west.

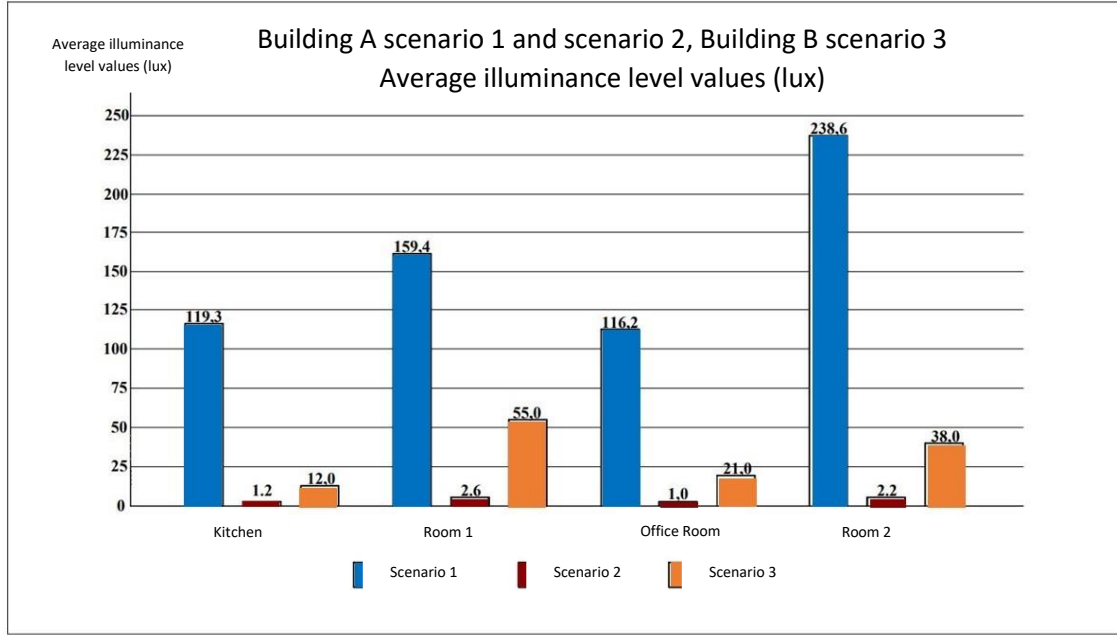


Figure 10. Average illuminance values for scenario 1 and scenario 2 for building A, scenario 3 for building B (A binası için senaryo 1 ve senaryo 2, B binası için senaryo 3 ortalama aydınlık değerleri)

Even between Room 1 and Room 2, which have the same room and window dimensions, Room 2 has 36% lower illuminance than Room 1. This situation can be related to the illumination of Room 2 from the north and the illumination of Room 1 from the south. In the analysis, in Building A, where 4.5 m² skylights were studied, there was a 96-98% decrease in average illuminance in first floor rooms when the

number of floors was increased from a single floor to 6 floors, compared to Scenario 2 Scenario 1. Looking at the illumination values of the 9 m² skylight in Scenario 3, we can see that the illumination values in the first floor of an 8-story building are higher than those of the 6-story building in Scenario 2 and that the skylight is twice as large.

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Numerous studies show that a qualified lighting design that provides sufficient daylight increases human work performance, ensures the maintenance of the circadian cycle in a healthy way, and positively influences mental health. Visual comfort, reducing the use of artificial lighting, and lowering energy consumption and costs are directly related to the effective use of daylight. Therefore, improper and unqualified lighting design not only leads to various psychological and physiological health problems in humans, but also increases the energy

consumption of buildings and brings cost and sustainability problems. In this study, the effect of skylight space, which is one of the methods of incorporating daylight into the building and is used as a solution in places with high building density where daylight cannot be provided directly, on indoor visual comfort and daylight performance was investigated. As a result of the study, it was found that the skylight space, for which limits are set in the zoning ordinance, cannot provide the required level of daylight in rooms as the number of

floors increases. In addition, artificial lighting should be used in locations where daylight cannot be adequately used during the day. While this results in an increase in lighting costs, it also negatively impacts the expectation of sustainability. The conditions discussed in the study are the current conditions in the Planned Area Designation Ordinance. Therefore, these conditions are inadequate in terms of spatial requirements. Even in a single-story building, the skylight does not provide adequate lighting, while these spaces become meaningless, especially in multi-story buildings. In this case, where the skylight is insufficient, the first step should be to improve the skylight conditions required by the regulation. It is recommended to increase the size of the skylight, increase the ratio between the windows that can be opened and the skylight, and install reflective, light-reflective materials along the surface at the top of the skylight and inside. In this regard, in the studies included in the literature review, the use of skylights with 4-10% skylight opening that can increase daylight, the use of guiding and reflective elements in the skylight space, the use of translucent photovoltaic windows, etc. Methods are recommended. In this way, it will be possible to provide sufficient daylight illumination and visual comfort, as the daylight reaches the first floor.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

There is no acknowledgements.

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)

Yaren Dilara ERDEM: She conducted the simulations, analyzed the results and performed the writing process.

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

Şule YILMAZ ERTEN: She analyzed the simulation results and performed the writing process.

Simülasyon sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Filiz UMAROĞULLARI: She performed the writing and controlling process.

Makalenin yazım ve kontrol 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] Gültekin, A.B., Bulut, B., 2015. Yeşil Bina Sertifika Sistemleri: Türkiye İçin Bir Sistem Önerisi. 2nd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS). 28-30 May 2015, Ankara.
- [2] Eurima, European insulation Manufacturers Association, Retrieved from: <https://www.eurima.org/>, Last Access: 02.02.2023.
- [3] Gürsoy, S., (2019). Gün Işığının Etkin Kullanımı Amacıyla Anidolik Tavan Sistemi Tasarımına Yönelik Bir Çalışma. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Richard, B. (2009). The Case for Daylighting in Architecture. International Journal of Architectural Research Archnet-IJAR 3(2). DOI:10.26687/archnet-ijar.v3i2.268.
- [5] Andersen, M. (2015). Unweaving the human response in daylighting design. Building and Environment 91(3). DOI:10.1016/j.buildenv.2015.03.014
- [6] Arpacıoğlu Ü., Çalışkan C. İ., Şahin B., Ödevci N., (2020) Fictional Design Support Model for Increasing Daylight Efficiency in Architectural Planning, Journal of Design Theory, 16 (29), 53-78.
- [7] Arpacıoğlu Ü., (2012), An Important Factor for Spatial Quality and Comfort: Günışığı, Architecture Magazine, 49(368) 48-52.
- [8] Uyan, E., Küçükdoğu, M.Ş., & Aydemir, I., (2018). Aydınlatma Kalitesini Belirleyen Psikolojik Parametrelerin Çalışma Alanı Örneğinde İncelenmesi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(33), 51-60.
- [9] Morghen, I., Turola, M. C., Forini, E., Di Pasquale, P., Zanatta, P. & Matarazzo, T. (2009). "III-Lighting Syndrome: Prevalence in Shift Work Personnel in the 86 Anaesthesiology and Intensive Care Department of Three Italian

- Hospitals". *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 4(6).
- [10] Şener Yılmaz F., (2016) The Effect of Solar Control Design on Visual Comfort and Daylight Performance: Office Buildings, *Online Journal of Art Design*, 4(4), 47-62.
- [11] Wirz Justic, A., Skene, D. J., & Münch, M., (2021). The relevance of daylight for humans. *Journal of Biochemical Pharmacology*, 191.
- [12] Kutlu R., (2019) Sunlight as a Design Element, *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication – TOJDAC*, 9 (2), 226-233.
- [13] Köknel Yener, A., (2007). Binalarda Günışığından Yararlanma Yöntemleri. VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresinde sunulan Sempozyum Bildirisi, 231-241. Erişim adresi: https://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/b4b098ecec636a3f_ek.pdf
- [14] Ünver, F.R., Çelik K., (2019), Sustainable Lighting Design Approach in Educational Buildings, *Çukurova University Journal of Engineering and Architecture Faculty*, 34(3), pp. 49-63
- [15] Acosta I., Navarro J., Sendra J. J., (2013), Towards an analysis of the performance of lightwell skylights under overcast sky conditions, *Energy and Buildings*, 64, 10-16.
- [16] Acosta I., Navarro J., Sendra J. J., (2015), Towards an analysis of the performance of monitor skylights under overcast sky conditions, *Energy and Buildings*, 88, 248-261.
- [17] Fang Y., Cho S., (2018), Sensitivity Analysis of skylight and clerestory design on energy and daylight performance of a retail building Western Kentucky university, Bowling
- [18] Erlendsson O., (2014), Daylight Optimization- A Parametric Study of Atrium Design: Early Stage Design Guidelines of Atria for Optimization of Daylight Autonomy.
- [19] Cochran E., Pei Z., Marion F., Kolosky A., Loftness V., Aziz A., (2014), Integrated Dynamic Skylight Solutions to Reduce Energy Consumption and Improve Indoor Lighting Quality in US Buildings Erica. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 5-50.
- [20] Mccluney R., (1984), SKYMOD Annual Energy Performance Simulation Model for Skylights, *Energy and Buildings*, 6, 353 – 360.
- [21] Xuan Q., Li G., Zhao B., Jiang B., Sun D., Zhang X., Tang J., Zhuang Y., Liu J., Li L., (2022), Evaluation of the smart daylighting control performance of the concentrating photovoltaic/daylighting system as the skylight in the building, *Solar Energy*, 238, 17-29.
- [22] Dolnikova E., Katunsky D., Darula S., (2020) Assessment of overcast sky daylight conditions in the premises of engineering operations considering two types of skylights, *Journal of Building and Environment*, 180.
- [23] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021. Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği. Retrieved from <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=23722&mevzuatTur=KurumVeKurulurYonetmeliği&mevzuatTertip=5> Last Access: 10.03.2023.
- [24] TS EN 17037 Binalarda Günışığı Standardı
- [25] Stevens, R. G., & Rea M. S. (2001). Light in the Built Environment: Potential role of Circadian Disruption in Endocrine Disruption and Breast Cancer. *Cancer Causes & Control* 12, 279–287.
- [26] Gehrt D., Hafner M., Grollov S. T., Eliassen M., Christoffersen J., (2019), Healthy Homes Barometer 2019 Growing up in (un)healthy buildings.
- [27] Katunsky, E. Dolnikova, B. Dolnik, (2018), Daytime lighting assessment in textile factory using connected windows in Slovakia; Case Study, *Sustainability* 10.
- [28] Krüger E.L., Fonseca S.D., (2011), Evaluating Daylighting Potential And Energy Efficiency İn A Classroom Building, *J. Renew. Sustain. Energy* 3, 63112 (2011)
- [29] Sümengen Ö., Köknel Yener A., (2015) Investigation of Daylight Variables in Determining Lighting Energy Performance in Buildings, *Erciyes University Journal of Science Institute*, 31 (2), 135-148.
- [30] Altensis, (2022), Retrieved from <https://www.altensis.com/hizmetler/designbuldr>, Last Access: 13.05.2022.
- [31] CIE International Commission on Illumination, Retrieved from <https://cie.co.at/publications/international-standards> Last access: 10.03.2023.