

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: 3

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Musa YILDIZ – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Doç. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürelî / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi
Bu sayıda görev alan Alan Editörleri / This number of people working	Prof. Dr. Ali KASAL – Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Prof. Dr. Erdal IRMAK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU – Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Prof. Dr. Servet ÇETE – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Hamit SOLMAZ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İdris CANDAN – Kocaeli Üniversitesi Doç. Dr. Tuğba TABANLIGİL CALAM – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Alper CALAM – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Orhan KAPLAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Fecir DURAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Alpay ÖZER – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Şükrü KALAYCI – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Sema GÖKÇE – Gazi Üniversitesi Öğr. Gör. Ayşenur ASLAN – Ankara Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR – Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi
Teknik Editör / Technical Editor	Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi

HAKKINDA

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

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

ABOUT

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

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

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

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

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

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

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

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

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

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. Polyester ve Poliüretan Döküm Teknikleriyle Klasik Tarz Mobilya Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Önder TOSUN, Mustafa ALTUNOK, İhsan KÜRELİ 572
2. Ardışık Düşük Doz α -Işınlının c-Si Güneş Hücresi Üzerine Etkisinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi), İsmail KABACELİK 582
3. Şebekeye Bağlı Dağıtık Üretim Sistemleri için Akıllı Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Asiye KAYMAZ ÖZCANLI 592
4. İç Mimarlık ve Tasarım Ofisindeki İşgörenlerin Çalışma Alanı Memnuniyetini Etkileyen Verimlilik Faktörleri (Araştırma Makalesi), Tahsin ÇETİN, Nilay GÖRMÜŞ, Mehmet ÇOLAK 613
5. Post-Treatment of Real Textile Wastewater by Using a Hybrid System Comprising of Electrocoagulation and Fenton-like Oxidation in the Presence of Perovskite/Activated Carbon Composite Catalyst (Araştırma Makalesi), Özlem BULCA, Burcu PALAS, Süheyda ATALAY, Gülin ERSÖZ 631
6. Strain Dependent Electronic Properties of Hexagonal Monolayer Boron Phosphide with GPAW using GLLB-SC and PBE (Araştırma Makalesi), Polat NARİN 643
7. Kanser Teşhis ve Tedavisinde Nano/mikromotor Teknolojisi (Derleme Makalesi), Ayşegül TÜRKER, Yunus Emre BÜLBÜL, Ayşegül UYGUN ÖKSÜZ, Gözde YURDABAK KARACA 652
8. İkinci El Otomotiv Sektöründe Kullanılan Şasi Dinamometrelerinin Ölçüm Doğruluklarının Araştırılması (Araştırma Makalesi), İbrahim YAVUZ, Turan Alp ARSLAN, Hüseyin BAYRAKÇEKEN, İbrahim MUTLU, Faruk Emre AYSAL 673
9. Cathode Materials for Microbial Fuel Cells (Derleme Makalesi), Işıl BİLGİÇ 685
10. İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasıyla Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Çalışması (Araştırma Makalesi), Salih ERMİŞ, Ramazan BAYINDIR, Mehmet YEŞİLBUDAK 695
11. Çocuk Odası Mobilyalarında Bulunan Organik Kimyasallar Üzerine Bir Araştırma (Araştırma Makalesi), Betül HUYUGÜZEL, Kemal YILDIRIM, Ahmet Fatih KARAKAYA 706
12. Recognition of Online Turkish Handwriting using Transfer Learning (Araştırma Makalesi), Esmâ Fatma BİLGİN TAŞDEMİR 719
13. Structure and Spectroscopic Studies of Bis Azo Compounds with S/SO₂ Bridges and Containing Cyclic-1,3-Dicarbonyl Groups (Araştırma Makalesi), Gülnihal ERTEN, Naki ÇOLAK 727

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

14. **DESIGN Third order Sinusoidal Oscillator Employing Current Differencing Cascaded Trans conductance Amplifiers** (Araştırma Makalesi), Arsen Ahmed MOHAMMED, Hüseyin DEMİREL 735
15. **Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Gizem HATIPOĞLU, Hüseyin ÜNAL, Salih Hakan YETGİN 744
16. **Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cüruf Esaslı Geopolimer Harçların Isıl Kür Ortamında Mekanik Özellikleri** (Araştırma Makalesi), Mustafa KOP1, Salih YAZICIOĞLU 756
17. **Al 5754 Alaşımının Ilık İşlem Koşullarında Derin Çekilebilirliği ve Sac Kalınlık Değişimi Açısından Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Mehmet Emin ÇETİN 766
18. **Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Performansının Enerji Tüketimine Etkilerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Yaren GÜVEN, Mustafa AKTAŞ 776
19. **Ağır Ticari Araç Süspansiyon Sistemleri için Modüler Taşıyıcı Kol Mekanizmasının Tasarımı ve Analizi** (Araştırma Makalesi), Kayhan ALTINEL, Ahmet YILDIZ, Celalettin YUCE 794
20. **Earth Air Thermoelectric Generators** (Araştırma Makalesi), Günay ÖMER 804
21. **Derin Öğrenme Yöntemleriyle Çapraz Veri Seti Değerlendirmesi Altında COVID-19 Tespiti** (Araştırma Makalesi), Yahya DOĞAN 813
22. **Experimental and Numerical Analysis of an Innovative High Power LEDs Thermal Management System, based on Heat Sink- Heat Pipe Design** (Araştırma Makalesi), Burcu ÇİÇEK1, Emre ÜRÜN, Necmettin ŞAHİN 824
23. **The Synthesis of a Controlled Release System Based on MMT Added IPN Type Hydrogels** (Araştırma Makalesi), Evrim SEVER1, Mehlika PULAT 837
24. **Taguchi Based Gray Relational Analysis of Production Parameters of Al7075/B4C/GNPs Hybrid Composites** (Araştırma Makalesi), Onur ALTUNTAŞ 850
25. **N-Benziletildiamin Birimi İçeren Yeni Schiff Bazlarının Sentezi, Karakterizasyonu ve İnsan Kolon Kanseri Hücreleri Üzerine Sitotoksik Etkilerinin Belirlenmesi** (Araştırma Makalesi), Fatma Hamurcu 857
26. **Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD** (Araştırma Makalesi), Bilge İMER 867

Polyester ve Poliüretan Döküm Teknikleriyle Klasik Tarz Mobilya Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi

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

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

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

Article Info:

Research article
Received: 28/12/2022
Revision: 04/04/2023
Accepted: 10/04/2023

Keywords

Classical Furniture,
Polyurethane,
Polyester,
Casting,
Furniture Production

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/12/2022
Düzeltilme: 04/04/2023
Kabul: 10/04/2023

Anahtar Kelimeler

Klasik Mobilya
Poliüretan
Polyester
Döküm
Mobilya Üretimi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada polyester ve poliüretan döküm teknikleri ile klasik mobilya üretim teknolojileri ve mobilya üretim yöntemleri incelenmiştir. / In this study, polyester and polyurethane casting techniques, classical furniture production technologies and furniture production methods were examined.



Resim/Figure A: MDF levhadan imal edilen konsol / Console made of MDF board

Önemli noktalar (Highlights)

- Poliüretan döküm / Polyurethane casting
- Polyester döküm / Polyester casting
- Klasik mobilya üretimi / Classical furniture production

Amaç (Aim): Gerçekleştirilen saha araştırmasında son yıllarda mobilya endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahip olan polyester ve poliüretan döküm teknikleri ile yapılan mobilya üretimi konusunda yeterli araştırma yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu eksikliğin giderilmesine bir derece katkısı olması amacıyla bu çalışmada polyester ve poliüretan döküm teknikleri ile klasik mobilya üretim teknolojileri, kullanılan malzemeler ve döküm teknikleri, mobilya üretim yöntemleri ve üretilen mobilyalar incelenmiştir. / In the field research carried out, it has been determined that there is not enough research on furniture production made with polyester and polyurethane casting techniques, which have a wide application area in the furniture industry in recent years. In this study, polyester and polyurethane casting techniques and classical furniture production technologies, materials used and casting techniques, furniture production methods and furniture produced are examined in order to contribute to the elimination of this deficiency.

Özgünlük (Originality): Ankara İli Siteler sanayi bölgesindeki işyeri ve imalathanelerde yerinde inceleme çalışmaları yürütülerek poliüretan ve polyester döküm üretim teknikleri araştırması yapılmış, her üretim aşaması takip edilerek prosesler ortaya çıkarılmıştır. / Polyurethane and polyester casting production techniques were researched by conducting on-site investigations at workplaces and workshops in Ankara Province Siteler industrial zone, and processes were revealed by following each production stage.

Bulgular (Results): Klasik mobilya üretiminde polyester ve poliüretan döküm teknikleri ile mobilya üretiminin hem avantajları ve üstünlükleri hem de mobilya üretimi için daha fazla ağaç kesilmesini önleyerek çevrenin korunmasına katkı sağlaması açısından her seviyeden üretici tarafından tercih edildiği görülmüştür. / It has been seen that polyester and polyurethane casting techniques in classical furniture production are preferred by manufacturers from all levels in terms of both the advantages and superiority of furniture production and contributing to the protection of the environment by preventing more tree cutting for furniture production.

Sonuç (Conclusion): Polyester ve poliüretan döküm teknikleri ile klasik tarz mobilya üretimine yönelik yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda üretilen mobilyaların ahşap malzemeye göre düşük maliyetli, uzun ömürlü, kolay şekillenebilen, hafif gibi avantajları ile klasik yöntemlere üstünlük sağladığı, bu nedenle piyasada yaygın olarak tercih edilir hale geldiği görülmüştür. / As a result of the examinations and researches on the production of classical style furniture with polyester and polyurethane casting techniques, it has been seen that the furniture produced is superior to classical methods with its advantages such as low cost, long life, easily shaped and light compared to wood material, therefore it has become widely preferred in the market.



Investigation of Classical Style Furniture Production Technologies with Polyester and Polyurethane Casting Techniques

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

¹Ahmet Yesevi Vocational and Technical Anatolian High School, 06350, Altındağ/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Article Info

Research article

Received: 28/12/2022

Revision: 04/04/2023

Accepted: 10/04/2023

Keywords

Classical Furniture,
Polyurethane,
Polyester,
Casting,
Furniture Production

Abstract

Considering the limited forest existence and unlimited human needs in our world, it may be a more consistent approach to produce furniture with artificial products rather than natural products, but it is natural to want these artificial materials to be less harmful to the environment. In the field research carried out, it has been determined that there is not enough research on furniture production made with polyester and polyurethane casting techniques, which have started to have a wide application area in woodworking industry and furniture in recent years. In order to contribute to the elimination of this deficiency, in this study; Classical furniture production technologies with polyester and polyurethane casting techniques, materials used and casting techniques, furniture production methods and furniture produced are examined. In the study, first of all, literature research was carried out, then on-site investigation studies were carried out in the workplaces and workshops in Ankara Province Sıteleler industrial zone, production techniques were researched, and processes were revealed by following each production stage. In the market research, it has been determined that the production method with polyester and polyurethane casting techniques is widely used. According to the results of the study, furniture production with polyester and polyurethane casting techniques according to other production techniques; It provides superiority with its advantages such as being long-lasting, easy to shape, paint and varnish, light weight and ease of application. It has been determined that polyurethane and polyester casting materials are used in the production of furniture in many different forms such as decorative appliques, crowns, frames, chairs, armchairs and tables. In addition, it can be said that more tree cutting can be prevented by protecting the environment as a result of production with polyester and polyurethane casting techniques. Due to the advantages identified, it can be predicted that the usage areas and quantities will increase in the coming years.

Polyester ve Poliüretan Döküm Teknikleriyle Klasik Tarz Mobilya Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 28/12/2022

Düzeltilme: 04/04/2023

Kabul: 10/04/2023

Anahtar Kelimeler

Klasik Mobilya
Poliüretan
Polyester
Döküm
Mobilya Üretimi

Öz

Dünyamızda sınırlı orman varlığı ve sınırsız insan ihtiyaçları dikkate alındığında mobilya üretimini doğal ürünlerden ziyade yapay ürünlerle üretmek daha tutarlı bir yaklaşım olabilir ancak bu yapay malzemelerin de çevreye daha az zararlı ürünlerden olmasının istenmesi doğaldır. Gerçekleştirilen alan araştırmasında son yıllarda ağaççşleri endüstrisi ve mobilyacılıkta geniş bir uygulama alanına sahip olmaya başlayan polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle yapılan mobilya üretimi ile ilgili yeterli araştırmanın olmadığı belirlenmiştir. Bu eksikliğin giderilmesine bir derece katkısı olması amacıyla bu çalışmada; polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle klasik tarz mobilya üretim teknolojileri, kullanılan malzemeler ve döküm teknikleri ile mobilya üretim yöntemleri ve üretilen mobilyalar incelenmiştir. Çalışmada öncelikle literatür araştırması yapılmış daha sonra Ankara İli Sıteleler sanayi bölgesindeki işyeri ve imalathanelerde yerinde inceleme çalışmaları yürütülerek üretim teknikleri araştırması yapılmış, her üretim aşaması takip edilerek prosesler ortaya çıkarılmıştır. Yapılan piyasa araştırmasında polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle üretim yönteminin yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre diğer üretim tekniklerine göre polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle mobilya üretimi; uzun ömürlü olma, kolay şekil alma, boya ve verniklenebilme, hafif ve uygulama kolaylığı gibi avantajları ile üstünlük sağlamaktadır. Poliüretan ve polyester döküm malzemelerinin özellikle dekoratif aplikler, taçlar, çerçeveler, sandalyeler, koltuk ve masalar gibi çok farklı biçimde mobilyaların üretiminde kullanıldığı saptanmıştır. Ayrıca polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle üretim sonucu çevrenin korunması sağlanarak daha fazla ağaç kesilmesinin önüne geçilebileceği söylenebilir. Tespit edilen avantajlarından dolayı önümüzdeki yıllarda kullanım alanlarının ve miktarlarının daha da artacağı öngörülebilir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobilya yaşam alanlarının süslenmesine ve çeşitli kullanım fonksiyonlarına göre donatılmasına yarayan eşyadır. Mobilya üretiminde farklı malzemeler kullanılabilir ancak en çok ağaç malzeme ve türevleri mobilyanın ana malzemesini oluşturmuştur [1].

Mobilya parçaları, insanların oturması ve dinlenmesi, çalışması, çalması, organize edilmesi veya gösterilmesi ve bölme alanı gibi birçok yönden yardımcı olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir [2].

Günümüz seri klasik tarz mobilya üretim teknolojisinde CNC (Computer Numeric Control/Bilgisayar Sayımlı Yönetim) makineler yoğun olarak kullanılmaktadır. Bilgisayar kontrollü üretim gerçekleştiren bu makineler için bilgisayar ortamında yapılan CAD (Computer Aided Desing/Bilgisayar Destekli Tasarım) tasarımların, CAM (Computer Aided Manufacturing/Bilgisayar Destekli İmalat) ortamında kolaylıkla üretilebildiği görülmekte ise de son yıllarda özellikle zaman ve maliyet sebebiyle poliüretan ve polyester esaslı kimyasal malzemelerin önceden hazırlanan döküm kalıplarına dökülmesi ile de klasik tarz mobilyalar daha ekonomik ve daha kısa sürede üretilebildiği görülmüştür.

Polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle mobilya üretim yönteminde, çift bileşenli sıvı halde poliüretan veya polyester döküm malzemeleri kullanılmaktadır. Ahşap oyma her türlü ayak, kayıt, taç, rustik vb. oymaların ilk olarak uygun kalıplar kullanılarak beyazı (silikon dökme) olarak adlandırılan kalıbı alınmakta, alınan bu ters oyma kalıplarına kullanılacak parçanın özelliklerine göre poliüretan veya polyester döküm dökülerek kurumaya bırakılmakta ve boyandığında tamamen ahşap görünümlü mobilya parçaları elde edilebilmektedir.

Üretilen parçalar sudan, nemden, sıcaktan etkilenmemekte, üst yüzey işlemlerinde özellikle kaliteli mobilya boyası kullanıldığında çok uzun ömürlü mobilyalar üretilebilmektedir. Ancak dökümlerin karışımının tekniğine uygun olmaması durumunda parçalar boyadıktan sonra da çalışabilmekte, formu bozulabilmektedir [3].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Gürleyen, geleneksel Türk süsleme motiflerinin günümüz mobilyalarına uygulanmasını isimli araştırmasında, özgün Türk mobilyasının yaratılmasında kullanılacak tasarım öğelerinin

tarama yöntemi ile elde edilmesi ve bunlardan yararlanarak prototip ürünler tasarlanmasını amaçlamıştır. Belirlenen tarama evreninde mobilya tasarımına ışık tutacak olan motifler ve sanat eserleri incelenerek derlenmiştir. Seçilen örnek motifler, günümüz modern mobilya çeşitleri üzerine yansıtılmaya çalışılarak, bilgisayar ortamında tasarımlar oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan farklı mobilya tasarımlarıyla özgün çizgileri olan tasarımlardan oluşan Türk mobilyasına ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir. Ancak Türk motifi çizgilerini taşıyan mobilyalar arasında günümüzde tekil mobilyaların daha çok ilgi gördüğü, çeşidin arttığı takdirde grup mobilyalara olan ilginin de artacağı ilgililerce belirtilmiştir. Türk motifi olarak oldukça zengin olan arşivlerden esinlenilerek yapılacak olan Türk mobilyalarının, tekil ve grup mobilya olarak yurtiçi ve yurt dışı pazarlarda talep görebileceğinden, girişimcilerin bu alana yönelmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır [4].

Kundakçı, Dolmabahçe Sarayı'nın Boulle tekniği mobilyaları ve koruma ilkeleri isimli çalışmasında, Dolmabahçe Sarayı mekânlarına yerleştirilmiş mobilyaların birçoğunun Fransa'dan getirildiğini ve bu mobilyaların özellikle "Boulle" tekniğiyle yapılmış mobilyalar olduğunu bildirmiştir. Çalışmanın araştırma yöntemi literatür taraması, yerinde inceleme, gözlem ve görüşme tekniklerini kapsamaktadır. Sonuçta Boulle-marküteri mobilyalarının Ulusal ve Uluslararası korunma ilkelerini belirtmiştir [5].

Aras ve Uzun, XV. Louis stili mobilyaların genel özellikleri ve günümüzdeki uygulamaları isimli araştırmalarında mobilya tarihinde önemli yeri olan XV. Louis stili mobilyaların; genel özellikleri ve günümüzdeki üretim yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca günümüzde uygulanan bazı örnekler asıl örnekleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, atelye tipi üretimlerde; üretim maliyetlerini düşürmek için, stilin özelliklerini tam olarak yansıtmayan, estetikten ve ergonomiden uzak örneklerin uygulandığı görülmüştür. Günümüzde kullanıcılar tarafından beğenilen ve aslına uygun örneklerin geliştirilmiş yeni makineler ve güncel ileri teknolojiler kullanılarak üretilmesinin hem mobilya ve dekorasyon sektörü hem de kullanıcılar açısından yararlı olacağı görüşüne varılmıştır [6].

Erdem, mobilya tarihine genel bakış ve art deco isimli araştırmasında, mobilya tasarım tarihinin gelişim süreci ve art deco dönemindeki tasarım ilkeleri ve gelişim süreci ele alınmıştır.

Mobilyaların art deco ile gösterişli ve coşkulu tasarımlardan uzaklaşarak, sade formlara ve zarafete geri dönüş ihtiyacı olduğunu belirtmiştir. Art deco akımının kökeninde geleneksel el sanatları atelyelerinde sade ve zarif üretimlere dayandığı fakat endüstri Devrimi'nin getirdiği makineleşmeye bağlı olarak seri ve hızlı üretimden etkilendiğini bildirmiştir [7].

Çalıkoglu, epoksilendirilmiş soya yağından tioglikolik asit ve tioglikolik asit metil esteri ile halka açarak oluşan poliollerden yeni poliüretan sentezi ve karakterizasyonu isimli çalışmasında, poliüretan kimyası ile ilk olarak Alman bilim adamı Otto Bayer tarafından 1937 yılında çalışıldığını, Otto Bayer'in poliüretanın babası olarak bilindiğini, poli katılma reaksiyonunun tamamen poliüretana dönüştüğü üçüncü bir yol olarak keşfettiklerini bildirmiştir [8].

Efstathiou, bir poliüretan prepolimerinin sentezi ve karakterizasyonu yeni bir akrilat bazlı polimer köpüğün geliştirilmesi isimli çalışmasında, ilk olarak toluen diizosiyanat ile dihidrik alkollerin reaksiyonu ile bazı poliüretanların üretildiğini, 1940'ta ilk poliüretan (PU) elastomerin üretildiğini bildirmiştir [9].

Sharmin and Zafar, Polyurethane: an introduction, isimli çalışmasında poliizosiyanatların 1952 yılında ticarileştiğini, poliüretanların ticari ölçüde 2. Dünya Savaşı'ndan sonra toluen ve polyester poliyolden üretildiğini, bunu takiben değişik türde polyester-poliizosiyanat sistemlerinin Bayer firması tarafından geliştirildiğini bildirmiştir [10].

Poliüretanlar yapılarında karbamat grupları (-NHCO₂) içeren moleküllerdir. Üretan grubu diizosiyanat ve poliölün reaksiyonu ile üretilir. 1930'ların sonlarında geliştirilen poliüretanlar bina yalıtımları, spor elbiseleri, yüzey kaplama malzemeleri olarak kullanılmıştır. Poliüretanlar polimer ailesine ait bileşiklerdir. Poliüretanlar içerdikleri karbamat gruplarına göre karakterize edilirler [11].

Yılmaz, cam elyaf katkılı doymamış polyester malzemelerde mineral katkıların mekanik ve tribolojik özellikleri isimli çalışmasında, poliüretan kimyasının çok yönlülüğü poliüretan kimyagerine, istenilen özelliğe sahip poliüretanı geliştirebilme olanağı sağladığını, poliüretanların çok çeşidi biçimlerde ortaya çıktığını ve bu çeşitliliğin devamlı olarak arttığını belirtmiştir. Poliüretan malzemenin uygulamacılara son ürünün özelliklerini kontrol etme imkânı verdiğini

belirtmektedir. Kompozit endüstrisinde önemli poliüretanların başında elyaf takviyeli termoset poliüretan malzemeler geldiğini belirtmektedir [12].

Doymamış polyester reçineler kompozit endüstrisinin lokomotif konumunda olup, kullanılan reçinelerin yaklaşık %75'ini temsil ederler. Kavramlarda meydana gelebilecek herhangi bir karışıklığı önlemek için tekstil ve giyim sanayinde de polyester elyafı olarak bilinen bir termoplastik ailesinin bulunduğu da bilinmelidir. Bu reçineler kompozit ve kompozit dışı parçaların enjeksiyon ile kalıplanmasında farklı gradelerde kullanılmaktadır. Polyesterler, kondensasyon polimerizasyonu sonucu oluşurlar. Ürün olarak alınan polimer, şebeke yapısı oluşturabilmek ve düşük viskozitede bir sıvı elde edebilmek amacıyla stiren gibi reaktif bir monomer içinde çözülür. Bu reçine sertleştiğinde, monomer polimer üzerindeki doymamış uçlar ile reaksiyona girer ve onu bir katı termoset yapıya çevirir [13].

Özel amaçlı polyesterler, genellikle polimerin kimyasal yapısından dolayı yüksek performans değerlerine ulaşmaktadırlar. Dolgu malzemelerinin veya katkıların uygun kullanımı da alev dayanımı, yorulma dayanımı veya kimyasallara karşı dayanıklılık gibi özellikleri artırabilir. Özel amaçlı polyesterlere ait parametreler, karşılıklı etkileşim içerisindedirler. Kimyasal dayanım gibi bir parametreye meydana gelen artış, ısı dayanımı gibi bir başka parametreyi de artırabilir. Stiren katkılı polyester reçineler kullanım kolaylığı ve sertleşme mekanizması açısından önem taşımaktadır. Polyester reçineler, önce çok düşük bir viskozite artışı ve sıcaklık değişikliği göstererek spesifik bir çalışma süresi (jelleşme süresi) sağlarlar. Reçineler, istenilen özellikleri sağlayacak ve prosese uygun olabilecek şekilde formüle edilerek üretilebilirler [14].

3. YÖNTEM (METHOD)

Geleneksel klasik tarz mobilya üretim teknikleri ve bilgisayar kontrollü makinelerle üretim yöntemlerine göre daha ekonomik ve seri üretime fırsat veren polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle klasik tarz mobilya üretim teknolojilerinin incelemesi çalışmasının ilk aşamasında; kütüphanelerde ve internette kaynak taraması yapılarak gerekli literatür araştırılmış ancak poliüretan ve polyester döküm teknikleriyle mobilya üretimi ile ilgili herhangi bir kaynağa ulaşılamamıştır. İkinci aşamada saha çalışması yapmak için Ocak 2022 ayı içerisinde araştırma yapmak üzere Ankara İli Siteler mobilya sanayi sitesine gidilerek kısa süreli çalışmalar yapılmıştır.

Bu ön araştırmalar sonucunda çalışmaya dâhil olabilecek örnekler belirlenmiştir. 10 Mart 2022 tarihinden itibaren de sanayi sitesi içerisinde işyeri ve imalathanelerde yerinde inceleme çalışmaları yürütülerek kalıp oluşturma, dökme, perdahlama ve boyama üretim çalışmaları ile ilgili incelemelere ve fotoğraf çekimine başlanmıştır. Farklı tarihlerde saha çalışmalarına devam edilmiş Haziran 2022 ayı sonunda tamamlanmıştır. Dijital olarak çekimi yapılan fotoğraflardan atelye tipi klasik tarzda mobilya üretim aşamaları belirlenmiştir. Çalışmada özellikle üretim aşamalarının tamamı fotoğraflanarak hangi mobilyaların hangi parçalarında, ünitelerinde ne şekilde uygulama alanı bulunduğ, tek tek fotoğrafların yanında açıklanmıştır.

4. BULGULAR (RESULTS)

Yapılan alan araştırması neticesinde günümüzde mobilya oymacılığında çoğunlukla oyma için uygun özellikleri ve ekonomik üstünlüklerinden dolayı ülkemizde de yetişen doğru kayını ve gürgen ağaçlarının tercih edildiğ belirlenmiştir. Poliüretan ve polyester döküm için kalıp olacak oyma parçaların da çoğunlukla doğru kayınından el işçiliğ ile ahşap oyma tasarımcıları ve ustaları tarafından imal edildiğ tespit edilmiştir. Resim 1’de masif oymalar, poliüretan ve polyester döküm için kullanılan kalıp örnekleri görülmektedir.



Resim 1. Masif oymalar, kalıp örnekleri (Solid carvings, mold samples)



Resim 2. Masiften üretilmiş klasik koltuklar (Classic armchairs made of solid)

Resim 2’de kayın, gürgen veya kızılğaç malzemeden üretilmiş tamamen masiften (ham) klasik koltuk örnekleri görülmektedir. Bu tip üretimde koltukların tüm parçalarının masif olması maliyet ve üretim süresi açısından olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

Özellikle son yıllarda hem ekonomik açıdan daha ucuz olması hem de daha fazla ağacın mobilya üretimi için kesilmesinin önlenmesi sağlanarak çevrenin korunmasına katkı sağlaması açısından farklı hammaddelerden mobilya üretiminin her seviyedeki üreticiler tarafından tercih edildiğ ve araştırıldığı gözlenmektedir.

Klasik mobilya üretiminde polyester ve poliüretan döküm, kimyasal ve hızlandırıcısı olarak çift bileşenli olarak kullanılmaktadır. Resim 3’de poliüretan döküm sıvılarının ambalajlı hali ve karışımları ile ilgili örnekler görülmektedir. Plastik kutularında polyester ve poliüretan sıvılarıyla hızlandırıcıları oda sıcaklığında ancak karıştırıp kalıba döküldüğünde kimyasal tepkime gerçekleşerek dökümün sıcaklığ artmakta hatta eli yakacak sıcaklık derecesine ulaşabilmektedir.



Resim 3. Poliüretan döküm sıvıları ambalaj ve karışım örnekleri (Polyurethane casting fluids packaging and mixture samples)

Poliüretan döküm yaklaşık 5 dakikada sertleşir iken polyester döküm hemen hemen iki katı sürede yaklaşık 10 dakikada sertleşebilmektedir. Polyester döküm sert bir şekilde oluştuğundan kırılığandır ve tel zımba ile akılmaya imkân vermemektedir. ivi ve tel zımba çakılması gereken yerler için poliüretan dökümlerin kullanılması gerekir. Resim 4’de poliüretan döküm sıvısı bidonu ve etiketi, döküm sırasında kullanılan plastik kap örnekleri görülmektedir.



Resim 4. Plastik kutusunda poliüretan döküm sıvısı ve etiketi (Polyurethane casting fluid and label in its plastic box)

Resim 5 ve 6'da bir stil masa ayağının kalıba dökülerek silikon ile beyaz kalıbının alındığı örneği görülmektedir. Bu işlemden sonra poliüretan ve polyester döküm sıvıları beyaz silikon içerisine dökülür ve aynı stil ayaktan çok sayıda ayak üretilmiş olur.



Resim 5. Bir stil masa ayağının beyazının alınmış hali (A white version of a style table leg)



Resim 6. Silikon ile beyaz kalıbın alınması (A white version of a style table leg)

Resim 7'de silikon ile beyaz kalıp alındıktan sonra poliüretan veya polyester döküm döküldüğü ile ilgili örnek görülmektedir.



Resim 7. Silikon ile beyaz kalıp alındıktan sonra döküm örneği (Casting sample after removing white mold with silicone)

Polyester döküm kimyasalı, poliüretan döküm kimyasalına göre boyayı bünyesine daha çabuk kabul etmektedir. Ayrıca polyester döküm, poliüretana göre daha ucuzdur. Yük taşıma kapasitesi poliüretana göre daha az olduğu için özellikle yük taşınması gereken mobilya parçalarının dökümünde, polyester dökümünün içine inşaatlarda betonun içine demir kullanımı gibi ahşap parçalar yerleştirmek faydalı olmakta böylelikle polyester döküm daha sağlam hale gelmektedir bununla ilgili örnekler Resim 8'de görülmektedir.



Resim 8. Polyester döküm ile üretilmiş ayakların içerisine masif çatalar koyularak ayakların dayanımının yükseltilmesi örneği (Example of increasing the strength of the feet by placing solid laths inside the feet produced with polyester casting)

Poliüretan veya polyester dökümü yapılacak mobilya parçaları öncelikle elde veya makinede oyularak hazırlanır daha sonra oyulacak parçanın üzerine beyaz silikon dökülerek döküm kalıbı imal edilir. Hazırlanan bu döküm kalıbının imalinde beyaz silikon kullanıldığından dolayı bu işleme beyazını almak, alınan döküm kalıbına da silikon beyazı denilmektedir. Resim 9 ve Resim 10'da yüzey oyma motifinin silikon beyazı (kalıbı) ve silikon arkası örnekleri görülmektedir.



Resim 9. Yüzey oyma motifinin silikon beyaz kalıbı (Silicone white mold of surface engraving motif)



Resim 10. Yüzey oyma motifinin silikon beyazı arkası (Silicon white back of surface engraving motif)

Üretim aşamaları yerinde incelenerek elde edilen bulgulara göre; poliüretan döküm uygulaması sonunda üretilen parça, polyester döküm parçasına göre daha beyaz renkte oluşmakta ayrıca kalıptan çıkarıldıktan sonra da oyma işlemleri yapılmasına imkân vermektedir. Resim 11’de MDF levha ile üretilmiş konsolun polyester dökümlerden yapılan ayakları ve yapıştırılan apliği, poliüretan dökümden yapılan kapak ön yüzü altına yapıştırılan döküm oyması örnekleri görülmektedir. Örnekte görüldüğü üzere farklı kimyasal maddelerle yapılan dökümlerin aynı mobilyada farklı yerlerde kullanıldığı görülmektedir.

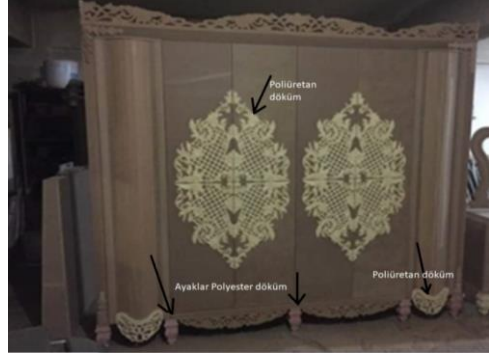


Resim 11. MDF levha ile üretilmiş konsolun polyester ve poliüretan döküm oyması (Polyester and polyurethane casting carving of console produced with MDF board)

Poliüretan dökümde hızlandırıcı kullanılmakta ancak bazı durumlarda dökümün dışı, kabuk kısmı kuruyup içi kurumayabilmektedir. Poliüretan döküm kimyasalının tam kuruması gerçekleşmediğinde istisnai olarak sıcakta yumuşayabilmektedir. Bu durum genelde, sıcak

bölgelerde, ülkemizde güneydoğu Anadolu bölgesi gibi veya Arap ülkelerinde yaşanabilmektedir. Polyester döküm döküldüğünde ise kuruma dökümün genelinde gerçekleşmekte, içinin kurumaması gibi olumsuzluklar yaşanmamaktadır.

Polyester döküm hazırlanırken bir yaklaşık 100 cc kimyasalın içine ortalama 20 gr. kadar şerit testerede kesilmiş kayın, çam kereste talaşı konulduğunda bu işlem döküme hem ahşap rengi vermekte hem de dökülen döküm mobilya parçasının daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Döküm tekniği ile yapılan mobilyalar daha ucuza mal olmakta, seri üretime fırsat vermektedir. Çünkü bir kez ahşap oyma işlemi yapılmakta daha sonra kalıbı alınmakta ve aynı kalıpla çok sayıda mobilya parçası imal edilebilmektedir. Resim 12’de görülen MDF levhadan üretilmiş bir elbise dolabında hem polyester hem de poliüretan dökümlerin aynı anda kullanıldıkları görülmektedir.



Resim 12. MDF levha ile üretilmiş elbise dolabına yapıştırılan poliüretan ve polyester dökümler (Polyurethane and polyester castings adhered to the wardrobe produced with MDF board)

Resim 13’de MDF levha ile üretilmiş karyola başlığı, ayakucu ve komodine yapıştırılan poliüretan döküm örnekleri görülmektedir.



Resim 13. MDF levha ile üretilmiş karyola başlığı, ayakucu ve komodine yapıştırılan poliüretan dökümler (Polyurethane castings made of MDF board and glued to the headboard, footboard and nightstand)

Resim 14’de MDF levha ile üretilmiş çift kapaklı büfeye yapıştırılan polyester döküm motifleri görülmekte olup büfe ön yan kenarlarındaki yarım sütuncelerinin, dolap tacının ve kapak apliklerinin polyester kimyasal malzemeden döküm tekniği ile üretilen parçalar olduğu görülmektedir.



Resim 14. *MDF levha ile üretilmiş çift kapaklı büfeye yapıştırılan polyester dökümler (Polyester castings attached to the double-door buffet produced with MDF board)*

Resim 15’de MDF levha ile üretilmiş konsola yapıştırılan polyester döküm örnekleri görülmekte olup konsol ön ayak ve sütuncelerin kapak apliklerinin döküm tekniği ile üretilmiş motiflerin yapıştırıldığı görülmektedir.



Resim 15. *MDF levha ile üretilmiş konsola yapıştırılan polyester dökümler (Polyester castings attached to the console produced with MDF board)*

Dökümlerin yüzeye yapıştırılmasında örneğin MDF yüzeyine yapıştırmada PVA (polivinil asetat) tutkalı veya hızlı yapıştırıcı kullanılabilir. Resim 16’da poliüretan döküm ile üretilmiş oyma mobilya tepeliğinin dışbükey mobilya kapağına yapıştırılmış hali görülmektedir.



Resim 16. *Poliüretan döküm ile üretilmiş oyma mobilya tepeliği (Carved furniture top made of polyurethane casting)*

Polyester veya poliüretan döküm yöntemi ile özellikle masa sandalye ayakları da yaygın olarak üretilmektedir. Resim 17’de poliüretan döküm tekniği ile üretilmiş oyma masa ayağı örneği görülmektedir.



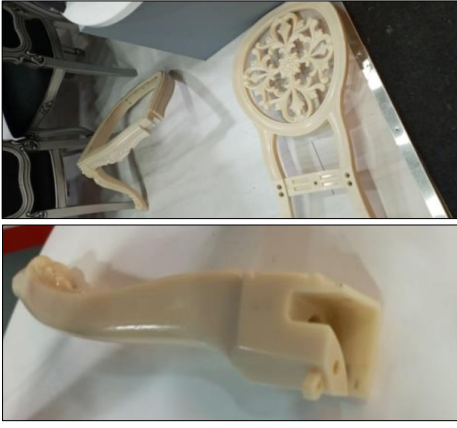
Resim 17. *Poliüretan döküm ile üretilmiş oyma masa ayağı (Carved table leg made of polyurethane casting)*

Dökümler masa, sandalye, sehpa ayağı olarak kullanılacak ise kayıtlarla birleştirilmesi için bağlantı noktalarına civatalar veya somunlar koyulması gerekir. Resim 18’de poliüretan döküm ayağın masa kayıtlarına bağlanması amacıyla masa kayıtlarına civataların yerleştirildiği görülmektedir.



Resim 18. *Poliüretan döküm ayağın montaj noktalarına civatalar yerleştirildiği örnek (Example where bolts are placed on the mounting points of the polyurethane cast foot)*

Resim 19’de polyester döküm tekniği ile üretilmiş sandalye parçalarının montaj edildiğinde birbirine kilitlendiği daha sonra metal civatalarla sıkıldığı ve mukavemetin arttırıldığı görülmektedir.



Resim 19. Polyester döküm ile üretilmiş sandalye parçaları (Chair parts made of polyester casting)

Poliüretan ve polyester döküm işleminden sonra döküm parçası önce kalın zımpara ardından ince zımpara ile zımparalanır sonra üzerine dolgu verniği uygulanır ardından su zımparası yapılarak son kat verniklenir ve akrilik uygulaması yapılır. Daha sonra istenirse pasta cila uygulanır tekrar üzerine su dökülerek keçeyle parlatılır. Resim 20’de döküm teknikleri ile üretilmiş klasik mobilyalara boya, vernik uygulamasının yapıldığı bir atelye örneği görülmektedir. Örnekte görülen küçük ölçekli atelyede boyanacak mobilyaların yerden yaklaşık 75-85 cm yükseklikteki ayakların üzerinde bulunduğu, atelyenin tek bir aspiratör ile havalandırıldığı görülmekte olup özellikle siteler sanayi sitesinde çoğu üst yüzey işlemleri atelyelerinin bu şekilde olduğu görülmüştür.



Resim 20. Döküm teknikleri ile üretilmiş klasik mobilyalara üst yüzey işlemleri uygulama atelyesi (Workshop for applying top surface treatments to classical furniture produced with casting techniques)

Resim 21’de poliüretan döküm ile üretilmiş klasik masa ayağı ve klasik koltuk örneği görülmektedir. Ayakların boyandığı ve montaja hazır olduğu, klasik koltuğunda döşenmeye hazır olduğu görülmektedir.



Resim 21. Poliüretan döküm ile üretilmiş klasik masa ayağı ve klasik koltuk (Classic table leg and classic armchair made of polyurethane casting)

Resim 22’de polyester döküm uygulanarak üretilmiş klasik bir konsol dolabına yapıştırılan aplikler ve kapak altı apliğinden detay görülmektedir.



Resim 22. Polyester döküm uygulanarak üretilmiş klasik bir konsola yapıştırılan aplikler ve kapak altı apliğinden detay (Detail from appliques and under-the-hood appliques attached to a classic console produced by applying polyester casting)

Resim 23 ve Resim 24’de poliüretan ve polyester döküm tekniği ile üretilmiş klasik yemek masaları, sandalyeleri ve konsol örnekleri görülmektedir. Son hallerine bakıldığında poliüretan veya polyester dökümden üretildiklerinin anlaşılması kolay değildir.



Resim 23. Poliüretan döküm ile üretilmiş klasik yemek masası ve sandalyeleri (Classic dining table and chairs produced with polyurethane casting)



Resim 24. Polyester döküm ile üretilmiş klasik yemek masası ve konsolu (Classic dining table and console made of polyester casting)

Resim 25’de polyester döküm ile üretilmiş klasik yatak odası mobilyaları örnekleri görülmektedir. Özellikle karyola başlığı, komodinin ön ayakları, tuvalet masası ön ayakları, çekmece aplikleri, ayna çerçevesinin bu uygulamalarla yapıldığı görülmektedir.



Resim 25. Polyester döküm ile üretilmiş klasik yatak odası mobilyaları (Classic bedroom furniture made of polyester casting)

Resim 26’da poliüretan döküm ile üretilmiş sandalyenin döşemeli ve döşemesiz halleri görülmektedir. Sandalyenin ön ayaklarının tepelik kısmının bu teknikle üretildiği görülmektedir.



Resim 26. Poliüretan döküm ile üretilmiş döşemeli ve döşemesiz sandalyeler (Upholstered and non-upholstered chairs made of polyurethane casting)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Son yıllarda ağaççileri endüstrisi ve mobilyacılıkta geniş bir uygulama alanına sahip olmaya başlayan polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle mobilya üretimi konusunda yürütülen bu çalışmada; polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle klasik tarz mobilya üretim teknolojileri, kullanılan

malzemeler ve döküm teknikleri ile mobilya üretim yöntemleri ve üretilen mobilyalar incelenmiştir. Polyester ve poliüretan döküm teknikleriyle klasik tarz mobilya üretimi ile ilgili inceleme ve araştırmalar neticesinde, üretilen mobilyaların ağaç malzemeye göre daha düşük maliyetle üretilmesi, uzun ömürlü olması, kolay şekil alabilmesi, hafif olması, uygulama kolaylığı, daha hızlı üretilmesi, su ve nemden etkilenmemesi, üst yüzey işlemlerine daha uygun olması gibi avantajları ile üstünlük sağladığı dolayısıyla piyasada yaygın olarak tercih edilir hale geldiği görülmüştür. Poliüretan ve polyester malzemelerle özellikle dekoratif aplikler, taçlar, sandalye, koltuk ve masalar, çerçeveler gibi çok farklı mobilyaların üretiminde kullanıldığı saptanmıştır. Ayrıca poliüretan ve polyester döküm malzemelerle üretim sonucu çevrenin korunmasına katkı sağlanarak fazla ağaç kesilmesinin önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Tespit edilen faydalarından dolayı önümüzdeki yıllarda kullanım alanlarının ve miktarlarının daha da artacağı öngörülebilir.

Araştırma belirli bir zaman aralığında yapılmış olması, Ankara İli Siteler mobilya sanayi bölgesindeki mobilya işletmelerinde yapılan yerinde incelemelere ve bu incelemelere imkân veren işletmelerin üretim yöntemlerine dayalı olması açısından bazı sınırlılıklar içermektedir. Bu sınırlılıklar; yerinde incelemeye imkân veren dört işletme ile yapılması ve 2022 yılında yapılması açısından sınırlıdır.

Çalışma sonuçlarına göre özellikle son yıllarda mobilya üretim firmalarının CNC makinesi maliyeti sebebiyle daha ekonomik olan poliüretan ve polyester döküm tekniklerini tercih ettikleri belirlenmiştir. Poliüretan ve polyester döküm tekniklerini ile üretilen mobilyaların avantajları nedeniyle daha yaygın olarak kullanılacağı öngörüldüğünden bu üretim yöntemlerinin daha da hızlandırılması, üretim kalitesinin artırılması, döküm sırasında renklendirme ve yüzey işlemleri ile ilgili araştırmaların yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu döküm oymalarının üç boyutlu yazıcılarla da üretilebilecekleri öngörülmektedir.

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] Efe, H., (2004). *Oturma mobilyası tasarımını etkileyen ergonomik kriterler*, 10. Uluslararası Ergonomi Kongresi, Bursa, 12-16.
- [2] Efe, H., (2015). *Mobilya tasarım kavramı ve eğilimler*, XXVII. Uluslararası Mobilya Mobilyaları Araştırmaları Kongresi, Ankara, 9-10.
- [3] Tosun, Ö., (2022), II. Abdülhamid Han Dönemi Mobilyalarının Tasarım, Konstrüksiyon Özellikleri ve Günümüzde Üretilebilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 155-180.
- [4] Gürleyen T., (2005). *Geleneksel Türk Süsleme Motiflerinin Günümüz Mobilyalarına Uygulanmasını*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-290.
- [5] Kundakçı, H., (2017). *Dolmabahçe Sarayı'nın Boulle Tekniği Mobilyaları ve Koruma İlkeleri*. Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 21-22
- [6] Aras R. ve Uzun O., (2010). XV. Louis stili mobilyaların genel özellikleri ve günümüzdeki uygulamaları, *Politeknik Dergisi*, 13(2):131-141.
- [7] Erdem, T., (2007). *Mobilya Tarihine Genel Bakış ve Art Deco*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-102.
- [8] Çalikoğlu, Y., (2017), Epoksitlenmiş Soya Yağından Thioglycolik Asit Metil Ester İle Halka Açan Poliollerle Yeni Poliüretan Sentezi Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 21-28.
- [9] Efstathiou, K., (2017), Synthesis and characterization of a Polyurethane Prepolymer for the development of a novel Acrylate-based polymer foam, *Budapest University of Technology and Economics (BME)*, 58-67.
- [10] Sharmin E. and Zafar F., (2012), Polyurethane: An Introduction, Chapter 6, 18-19.
- [11] How Products Are Made, <http://www.madehow.com/Volume6/Polyurethane.html> Erişim Tarihi: 11.12.2022
- [12] Yılmaz, M. G., (2006), Cam Elyaf Katkılı Doymamış Polyester Malzemelerde Mineral Katkıların Mekanik ve Tribolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 16-21.
- [13] Garcia, J., Mallol, C., Bou, E., Silva, G., Fernandez, J., Molina, A., Romera, J., (2003), Recycling Marble working wastes in manufacturing ceramic products, *CFI Ceramic Forum International*, Vol:80, 84-90.
- [14] Ohama, Y., (1997), Recent progress in concrete-polymer composites, *Advanced Cement Based Materials*, Vol:5, 31-40.

Ardışık Düşük Doz γ -Işınlarının c-Si Güneş Hücresi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Ismail KABACELİK ^{1*} 

¹Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Bartın, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/11/2022
Düzeltilme: 01/12/2022
Kabul: 07/12/2022

Anahtar Kelimeler

⁶⁰Co
Gama Işıması
Güneş Hücresi
Elektriksel Karakterizasyon

Article Info

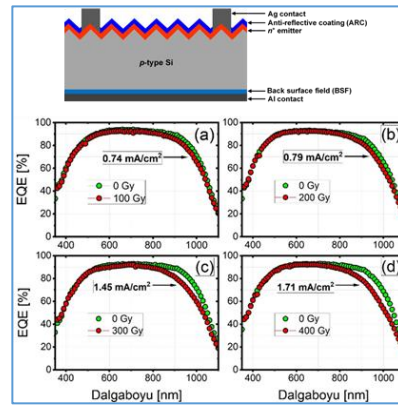
Research article
Received: 05/11/2022
Revision: 01/12/2022
Accepted: 07/12/2022

Keywords

⁶⁰Co
Gamma Irradiation
Solar Cell
Electrical Characterization

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmada, düşük dozlu ardışık gama (γ) ışınlarının tek kristalli Silikon (c-Si) güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özellikleri üzerindeki etkisi, karanlık ve AM1.5G ışık altında akım-gerilim (I-V), dışsal kuantum verimliliği (EQE), kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ ω -V) ölçümleri kullanılarak radyasyon öncesi ve sonrasında incelendi. / In the study, the effect of sequential low-dose gamma (γ) rays on electrical and spectral properties of mono-crystalline Silicon (c-Si) solar cells were investigated via dark and AM1.5G light current-voltage (I-V), external quantum efficiency (EQE), capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ ω -V) measurements before and after irradiation.



Şekil A: Üretilen c-Si güneş hücresinin yapısı ve ışınlanmamış ve ışınlanmış hücrelerin dışsal kuantum verimliliği (EQE) ölçümleri. / **Figure A:** Structure of fabricated c-Si solar cell and external quantum efficiency (EQE) measurements of un-irradiated and irradiated cells.

Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışma, c-Si güneş hücrelerinde gama ışınlanmanın neden olduğu etkileri bildirmektedir. / This study reports gamma irradiation induced effects on c-Si solar cells.
- Gama ışınlama dozlarının artmasıyla birlikte c-Si güneş hücrelerinin elektriksel özellikleri ve spektral tepkisi daha da etkilenmiştir. / The electrical properties and spectral response of c-Si solar cells were further influenced by increasing gamma irradiation doses.
- Güneş hücrelerinin çıkış parametrelerinin bozulması, azınlık taşıyıcı ömürleriyle ilişkilidir. / The degradation of output parameters of solar cells is related to the minority carrier lifetimes.

Amaç (Aim): Çalışma, düşük dozlu ardışık γ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özelliklerini inceledi. / The study examined the electrical and spectral characteristics of solar cells that were exposed to low-dose sequential γ -rays.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, uygulanan radyasyon dozu ile hücrelerde kaybedilen akım miktarı arasında bir bağlantı kurmuştur. / This study established a correlation between the applied radiation dose and the amount of lost current in the cells.

Bulgular (Results): Araştırma, hücrelerin elektriksel ve spektral özelliklerinin radyasyon dozuna orantılı olarak bozulduğunu ortaya çıkardı. / The research revealed that the electrical and spectral properties of the cells deteriorated in proportion to the radiation dose.

Sonuç (Conclusion): Çalışma, uygulanan sıralı radyasyon miktarı ile J_{sc} değerindeki azalma arasında doğrudan bir ilişki olmadığını gösterdi. Bu durum, hücrelerin inceltmesinin radyasyon kaynaklı bozulmayı azaltabileceğini ve hücre ömrünü artırdığını göstermektedir. / The study showed that there was no direct correlation between the quantity of sequential radiation applied and the reduction in J_{sc} value. This highlights the possibility that thinning the cells may reduce radiation-induced degradation and enhance the cells' lifetime.



Ardışık Düşük Doz γ -Işınlarnın c-Si Güneş Hücresi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

İsmail KABACELİK ^{1*}

¹Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Bartın, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/11/2022
Düzeltilme: 01/12/2022
Kabul: 07/12/2022

Anahtar Kelimeler

⁶⁰Co
Gama Işıması
Güneş Hücresi
Elektriksel
Karakterizasyon

Öz

Çalışmada, ardışık düşük doz gama (γ) ışınlarının mono-kristal Silisyum (c-Si) güneş hücresinin elektriksel ve spektral özellikleri üzerine etkisi incelendi. γ -ışını kaynağı olarak ⁶⁰Co kullanıldı. c-Si güneş hücresinin performansı, radyasyon öncesi ve sonrası karanlık ve AM1.5G ışık koşullarında alınan akım-voltaj (I-V), dışsal kuvantum verimlilik (EQE), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) ölçümleri ile belirlendi. Deneysel sonuçlar, radyasyona maruz kaldıktan sonra hücrelerin idealite faktörlerinin arttığını göstermektedir. Doz miktarı arttıkça kısa devre akımı (I_{SC}) ve verim (η) değerleri azalırken, açık devre voltajı (V_{OC}) ve doluluk faktörü (FF) değerleri ise yaklaşık sabit kaldığı görüldü. EQE ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, radyasyon kaynaklı hasarın güneş hücresinin taban katmanında (p-tipi) oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca, aygıt performansındaki değişim C-V ve G/ ω -V ölçümleri ile de doğrulandı. Deneysel sonuçlar, radyasyon öncesi ve sonrası karşılaştırılarak tartışıldı.

Investigation of the Effect of Successive Low-Dose γ -Rays on c-Si Solar Cell

Article Info

Research article
Received: 05/11/2022
Revision: 01/12/2022
Accepted: 07/12/2022

Keywords

⁶⁰Co
Gamma Irradiation
Solar Cell
Electrical
Characterization

Abstract

In the study, the effect of sequential low-dose gamma (γ) rays on electrical and spectral properties of mono-crystalline Silicon (c-Si) solar cells were investigated. ⁶⁰Co was used as the γ -ray source. Performance of c-Si solar cells was determined via dark and AM1.5G light current-voltage (I-V), external quantum efficiency (EQE), capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ ω -V) measurements before and after irradiation. Experimental results show that ideality factors of cells increase after exposure to radiation. As the dose increased, the short-circuit current (I_{SC}) and efficiency (η) values decreased, while the open-circuit voltage (V_{OC}) and fill factor (FF) values remained approximately constant. EQE measurements show that radiation-induced damage occurs in the base layer (p-type) of the solar cell. In addition, the change in device performance was confirmed by C-V and G/ ω -V measurements. Experimental results are discussed by comparing before and after radiation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş hücreleri, güç kaynağı olarak çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında da önemli bir yere sahip olan güneş hücrelerinin kararlı ve uzun süreli kullanımları hücrelerin radyasyon dayanıklılığı ile yakından ilişkilidir. Güneş hücreleri uzay ortamında gama, elektron ve proton gibi çeşitli radyasyon tiplerine maruz kalmaktadır [1–4]. Bu durum güneş hücresinin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Enerjik radyasyonun hedef malzeme ile etkileşmesi ile oluşan kusurlar, örgü atomlarının elektriksel olarak aktif oldukları konumdan ayrılarak inaktif oldukları konumlara yerleşmesi

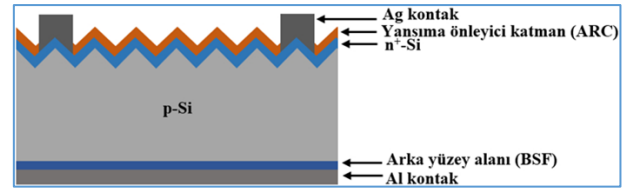
sonucu oluşmaktadır [5]. Bu kusurlar azınlık yük taşıyıcıların yarı ömrünü veya difüzyon uzunluğunu etkileyerek güneş hücresinin elektriksel ve optik özelliklerinin bozulmasına neden olmaktadır [6]. Boşluklardan ve atomlar arası konumlara yerleşmelerden (elektriksel olarak aktif olmayan atomlar) kaynaklanan bu hasarlar, yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde yeni enerji düzeylerinin oluşmasına neden olmaktadır [7,8]. Radyasyon indüklü yeni enerji düzeyleri, tuzak enerji düzeyleri olarak davranarak, yük taşıyıcılarının difüzyon uzunluğunun veya yarı ömrünün azalmasına neden olmaktadır [9–11]. Azınlık taşıyıcısı yeniden birleşme merkezleri, güneş hücresinin foton soğurması sonucunda oluşan elektronların vedeşiklerin yeniden birleşmesine

neden olurlar. Bu durum, p-n eklemının taban katmanındaki (base layer) azınlık yük taşıyıcılarının azalmasına neden olduğu için güneş hücresinin çıkış performansının kötüleşmesi ile sonuçlanır [12–14]. Diğer taraftan, çoğunluk yük taşıyıcısı tuzak merkezleri, çoğunluk yük taşıyıcılarını yakalayıp (n-tipi bölgede elektronlar, p-tipi bölgede deşikler) malzemenin iletkenliğinin azalmasına neden olur [15]. Güneş hücresinin çok fazla radyasyona maruz kalması malzemenin iletkenliğini kaybederek oldukça dirençli bir yapıya dönüşmesine neden olur. Çalışma ortamı genellikle güneş hücrelerinin bakımını engellediğinden, hücrelerin radyasyon dayanıklılığının belirlenmesi için test edilmeleri gerekmektedir. Literatürde farklı dozlarda γ -ışınlarına maruz kalmış güneş hücresi ile ilgili çalışmalar mevcut olup, bu çalışmalarda güneş hücreleri daha çok yüksek dozlarla maruz bırakılmıştır [1–7]. Düşük dozlarda ve ardışık değerlerde γ -ışınlarına maruz bırakılmış c-Si güneş hücreleri ile ilgili detaylı çalışmalar ise tespit edilememiştir. Çalışmada, ardışık düşük doz γ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özelliklerinin yanı sıra radyasyon sonrası kayıp akım miktarı ile uygulanan doz miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Güneş hücreleri, Czochralski yöntemiyle büyütülmüş kalınlığı 160 μm , direnci 1-3 $\Omega\cdot\text{cm}$, kristal doğrultusu (100), boyutları 156 mm \times 156 mm olan p-tipi Si pul kullanılarak yapılmıştır. Yayıcı katmanı (n^+), p-tipi Si pul içine fosfor difüzyonu ile oluşturuldu. Eklem derinliği ~ 500 nm'dir. Bor (p-tipi) ve fosfor (n^+ -tipi) konsantrasyonları sırasıyla $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ dir. Güneş hücresi yapımı ile ilgili detaylara referans [16] ve [17] den ulaşılabilir. Üretilen güneş hücresi lazer ile boyutları 2.8 x 2.8 cm^2 olan küçük hücrelere bölündü. Üretilen güneş hücresinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Her bir güneş hücresinin elektriksel karakteristikleri ve spektral tepkileri γ -radyasyonu öncesi ve sonrası ayrı ayrı ölçülmüştür. Karanlık I-V ölçümleri Keithley 2440 akım-gerilim kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Işık altındaki I-V ölçümleri ise AM1.5G koşulları altında Newport güneş benzetici kullanılarak elde edildi. c-Si güneş hücrelerin EQE ölçümleri monokromatör, dilici, davranış ile benzerlik göstermektedir [18]. Doz miktarı arttıkça karanlık akımdaki artış, tuzak enerji seviyelerinin artması sonucu azınlık yük taşıyıcılarının yarı ömürlerinin azalması ile ilişkilendirilmektedir [19,20]. Tablo 1'de ise c-Si hücrelerin radyasyon öncesi ve sonrası ölçülen yarı-

kenetlemeli yükselteç ve kalibre edilmiş ışık dedektörü ile donatılmış bir sistem kullanılarak 300-1100 nm dalgaboyu aralığında 10 nm dalgaboyu adımlarla ölçülmüştür. Güneş hücrelerin C-V ve G/ω -V ölçümleri HP4192A LF empedans analizörü ile 100 kHz frekansta karanlık koşullarda gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin radyasyon dayanıklılığını belirlemek için hücreler farklı dozlarda enerjisi 1.25 MeV olan γ -ışınlarına maruz bırakılmıştır. γ -ışını kaynağı olarak ^{60}Co kaynağı kullanıldı. Her bir hücre sırasıyla 100, 200, 300 ve 400 Gy doz miktarlarına ayrı ayrı maruz bırakıldı. Doz miktarı 10 Gy/dakika olarak sabit tutulmuştur. Işınlama ve ölçümler oda sıcaklığında ve normal atmosferik koşullarda gerçekleştirildi. Elektriksel ve spektral ölçümler, güneş hücreleri γ -ışınına maruz kaldıktan bir gün sonra elde edilmiştir.



Şekil 1. Üretilen güneş hücresinin şematik görünümü (The schematic view of the fabricated solar cell)

Çalışmada, düşük doz γ -radyasyonunun c-Si güneş hücrelerinin elektriksel karakterizasyonu ve spektral tepkisi üzerine etkisi, radyasyon öncesi ve sonrası karanlık ortamdaki I-V, AM1.5G koşullarında I-V, C-V, G/ω -V ve EQE ölçümleri alınarak incelendi. Deneysel sonuçlar analiz edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

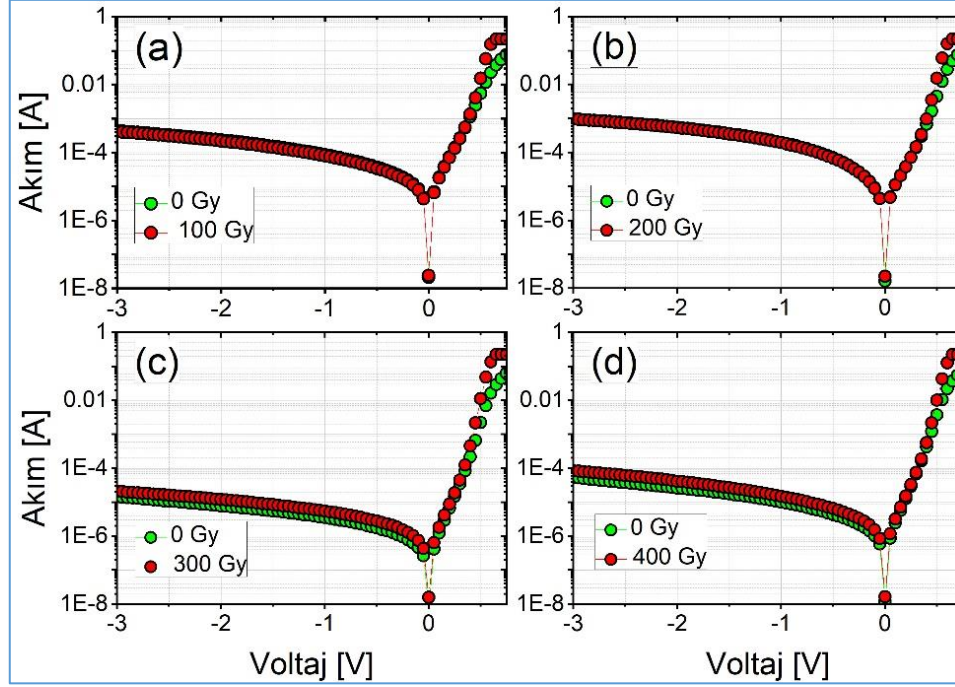
3. BULGULAR (RESULTS)

Şekil 2'de ardışık doz γ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası karanlık koşullarda ve oda sıcaklığında ölçülen I-V karakteristikleri verilmiştir. Ters besleme bölgesinde doz miktarına bağlı olarak karanlık akımın arttığı görülmektedir. Düşük doz γ -radyasyonuna maruz kalan güneş hücrelerinin I-V karakteristiklerinin ters besleme bölgesi karanlık akımındaki davranış, kGy mertebesinde γ -radyasyonuna maruz kalan hücrelerde de gözlenen

logaritmik I-V eğrilerinin lineer kısmının eğiminden hesaplanan idealite faktörü değerleri verilmiştir. Güneş hücreleri γ -ışınlarına maruz kaldıktan sonra idealite faktöründe artmanın olduğu görülmektedir. İdealite faktörü 2'ye eşit olduğunda tükenme bölgesinde elektron ve deşiklerin üretim

ve yeniden birleşmesi baskın iken, 1'e eşit olduğunda ise difüzyon akımı baskın durumdadır [21]. Güneş hücresi iç parametresi olan idealite faktörü, γ -ışınlarının etkisi sonucu azınlık yük taşıyıcılarının yarı ömrünün azalmasına bağlı olarak artmaktadır. Ters besleme bölgesinden de

görüleceği üzere radyasyon doz miktarı arttıkça üretim akımı da artmakta, bu durum ise artan idealite faktörü ile tutarlı olarak yeniden birleşme merkezleri olarak işlev gören kusurların artması ile ilişkilidir.



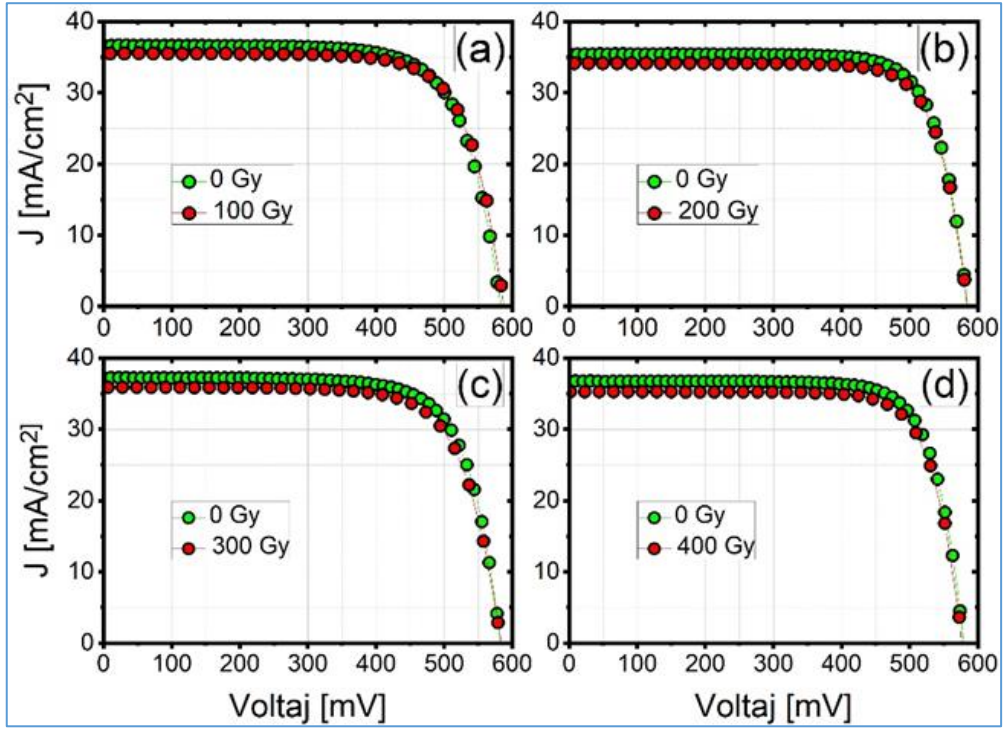
Şekil 2. Farklı dozlara maruz kalan c-Si güneş hücrelerinin karanlık koşullarda alınan I-V karakteristiği (I-V characteristics of c-Si solar cells exposed to different doses under dark conditions)

Tablo 1. c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası idealite faktörü (n) değerleri (Ideality factor (n) values of c-Si solar cells before and after radiation)

	100 Gy	200 Gy	300 Gy	400 Gy
İşinlanmamış	1,57	1,50	1,39	1,42
İşinlanılmış	2,38	2,03	1,79	1,99

Şekil 3'te, farklı dozlarda γ -ışınlarına maruz kalmış dört farklı güneş hücrelerinin AM1.5G aydınlatma koşullarında ve oda sıcaklığında ölçülmüş I-V karakteristikleri verilmiştir. Doz etkisini görmek için radyasyona maruz kalmamış her bir hücrenin I-V grafikleri de karşılaştırma için birlikte verilmiştir. I-V grafiklerinden de görüldüğü üzere radyasyonun

etkisi ile her bir hücrenin I_{SC} değeri azalmaktadır. Doz miktarı arttıkça I_{SC} değerindeki azalma daha da belirgin hale gelmektedir. I_{SC} değerindeki azalma, ışık ile oluşan azınlık yük taşıyıcıları için yeniden birleşme merkezleri olarak davranan γ -indüklü kusurlardan kaynaklanmaktadır [2,19].



Şekil 3. Doz miktarına bağlı olarak c-Si güneş hücrelerinin AM1.5G koşullarında oda sıcaklığında alınan I-V grafikleri (I-V curves of c-Si solar cells under AM1.5G conditions at room temperature, depending on the dose level)

Şekil 3'te verilen I-V eğrilerinden açık devre voltajı (V_{OC}), kısa devre akımı (I_{SC}), doluluk faktörü (FF) ve verim (η) gibi temel güneş hücresi parametreleri hesaplanabilir.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1)$$

V_{MP} ve I_{MP} sırasıyla maksimum güç noktasındaki voltaj ve akımı göstermektedir.

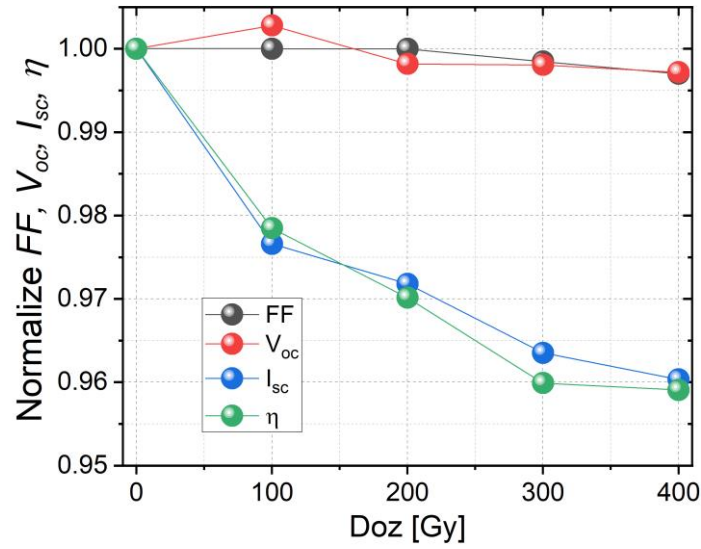
Güneş hücresi için η ise Eş. 2 ile verilmektedir.

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2)$$

P_{in} güneş hücresi üzerine gelen ışık gücüdür.

AM1.5G ışık koşulları altında alınan I-V eğrilerinden elde edilen normalize edilmiş güneş hücresi parametrelerinin uygulanan ardışık düşük doz miktarına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Normalizasyon işlemi, her bir hücrenin radyasyona maruz kalmamış ilk durumundan elde edilen hücre

parametreleri ile karşılaştırılarak elde edilmiştir. Şekil 4'ten de görüleceği üzere, doz miktarından bağımsız olarak V_{OC} ve FF değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı ve eğilimin yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Fakat, doz miktarı arttıkça I_{SC} ve η değerlerindeki değişim ise azalma yönündedir. η değerindeki azalma I_{SC} değerindeki azalma ile yakından ilişkilidir. Düşük dozda gözlenen azalma, azınlık yük taşıyıcılarının yaşam süreleri veya difüzyon uzunluğundaki azalma ile ilişkilendirilmektedir [9,22,23]. Radyasyon indüklü oluşan kusurlar yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde yeni tuzak enerji seviyeleri oluşturarak azınlık yük taşıyıcılarının ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır [24]. Bu nedenle, azınlık yük taşıyıcılarının yaşam süreleri γ -indüklü kusurlara duyarlı olup, bu durum güneş hücrelerinin elektriksel özelliklerini olumsuz etkilemektedir [25]. Düşük doz miktarlarında bile gözlenen bu etki, yüksek doz miktarlarında daha da artarak güneş hücresinin çıkış performansını çok fazla etkilemektedir [19].



Şekil 4. Farklı dozlarda c-Si güneş hücrelerinin çıkış parametrelerindeki değişim (Variation in output parameters of c-Si solar cells at different doses)

Tablo 2’de radyasyon öncesi ve sonrası farklı doz miktarlarına karşılık gelen hücrelerin seri direnç (R_s) değerleri verilmiştir. Güneş hücreleri radyasyona maruz kaldıktan sonra seri dirençlerde artmanın olduğu görülmektedir. Güneş hücresi iç parametresi olan R_s değerindeki artma, radyasyon indüklü oluşan yeniden birleşme merkezleri ile ilişkilidir. Bu kusurlar azınlık yük taşıyıcılarının

yarı ömürlerinde veya difüzyon uzunluğunda azalmaya neden olarak, taban katmanının (p-tipi) direncinin artması şeklinde etki etmektedir [2]. Radyasyon sonrası güneş hücresi iç parametresi olan n ve R_s değerlerindeki artış, çıkış parametreleri J_{sc} ve η değerleri üzerine olumsuz yönde yansıdığı Şekil 4’ten de görülmektedir [26].

Tablo 2. c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası seri direnç (R_s) değerleri (Pre- and post-radiation series resistance (R_s) values of c-Si solar cells)

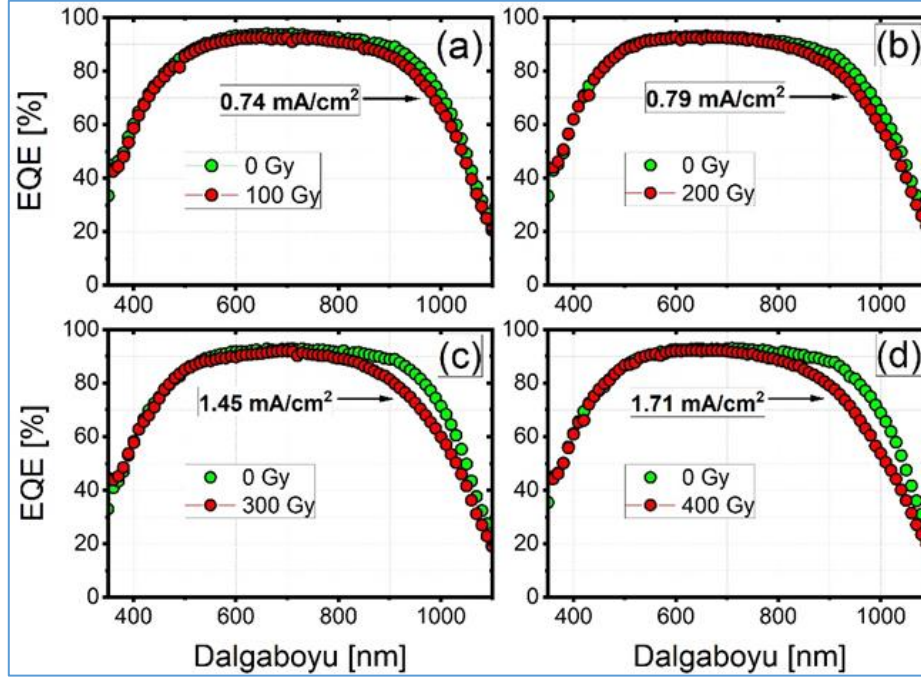
	100 Gy	200 Gy	300 Gy	400 Gy
Işınlanmamış	0,46	0,55	0,67	0,58
Işınlanmış	0,54	0,64	0,73	0,69

EQE ölçümleri, foton dalgaboyuna göre güneş hücresinin davranışını anlamak için kullanılan önemli bir ölçüm yöntemidir. Şekil 5’te her bir örneğin ayrı ayrı radyasyon öncesi ve sonrası EQE ölçümlerinin karşılaştırılması verilmiştir. EQE spektrumlarına bakıldığında, uygulanan doz miktarından bağımsız olarak elektromanyetik spektrumun kısa dalgaboyu bölgesinde değişimin olmadığı, spektrumunun uzun dalgaboyu bölgesinde ise radyasyonun etkisi ile azalmanın olduğu görülmektedir. Spektrumun kısa dalgaboyu bölgesi yüksek enerjiye sahiptir, bu da düşük soğurma derinliği anlamına gelmektedir. Kısa dalgaboyu bölgesinde önemli bir değişimin olmaması güneş hücresinin yayıcı katmanının (n-tipi) γ -radyasyonundan etkilenmediğini ya da ihmal

edilebilir seviyede etkilendiğini göstermektedir. Bu durum, tükenme bölgesi civarında yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılan yük taşıyıcıları yeniden birleşme olmaksızın ilgili bölgeye rahatlıkla geçebileceğine işaret etmektedir. Ancak, spektrumun uzun dalgaboyu ($750 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$) bölgesinde ise EQE değerlerinde azalmanın olduğu görülmektedir. Bu azalma, radyasyon doz miktarı arttıkça da artmaktadır. Uzun dalgaboyu bölgesindeki fotonlar güneş hücresinin soğurucu katmanında (p-tipi) soğurulmaktadır. Radyasyon dozuna bağlı olarak uzun dalgaboyu bölgesindeki kayıplar Şekil 3’te verilen J_{sc} değerlerindeki azalma ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Uzun dalgaboyu bölgesindeki kayıpların temel nedeni, radyasyon sonrası güneş

hücresinin taban katmanında (p-tipi) kusur oluşumudur [19,27]. Ayrıca, doz miktarı arttıkça oluşan kusurların miktarı da artmaktadır. Bu kusurlar, yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde tuzak enerji seviyeleri oluşmasına neden olmaktadır. Taban katmanında oluşan kusurlar

azınlık yük taşıyıcıların yaşam sürelerinin veya difüzyon uzunluğunun kışalmasına neden olur [19,20]. Böylelikle, foton ile oluşturulan taşıyıcılar tuzak enerji seviyesi merkezlerinde yeniden birleşerek güneş hücresinin performansını olumsuz etkilemektedir.



Şekil 5. γ -ışınlarına maruz kalmış c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası EQE spektrumları. Her bir hücre için Eş. 3 yardımı ile hesaplanan kayıp J_{SC} değerleri spektrumlar üzerinde gösterilmiştir (Pre- and post-radiation EQE spectra of c-Si solar cells exposed to γ -rays. The loss in J_{SC} values calculated with Eq. 3 for each cell is shown on the spectra)

Güneş hücrelerinin J_{SC} değeri I-V ölçümlerinden elde edilebileceği gibi EQE spektrumundan da hesaplanabilir. Çünkü, EQE foto-akımın spektral dağılımıdır. Her bir hücrenin radyasyon öncesi ve sonrası J_{SC} değerleri Eş. 3'te verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Eşitlikte verilen $J_{\gamma,AM1.5G}(\lambda)$, ASTM G173-03 referans spektrumundan alınan AM1.5G verilerinden türetilen, dalgaboyu aralığı başına gelen foton akım yoğunluğudur.

$$J_{SC} = \int EQE(\lambda) J_{\gamma,AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

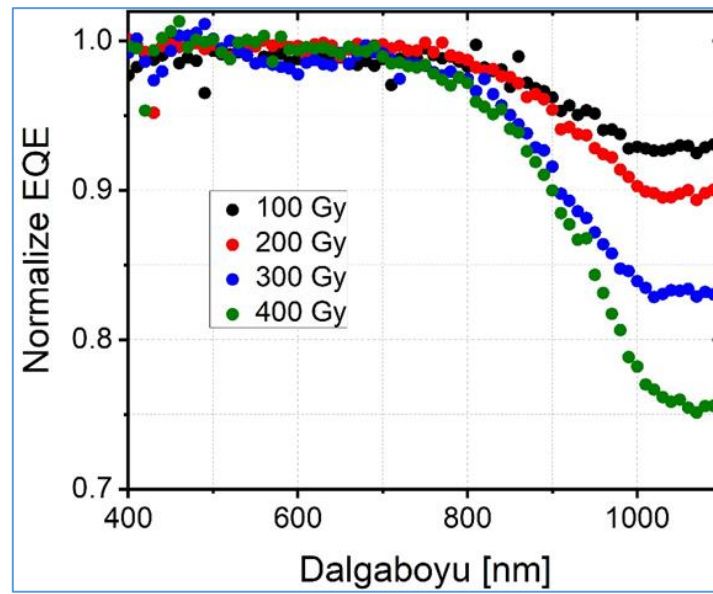
Eş. 3 ile hücrelerin J_{SC} değerleri hesaplanarak radyasyonun etkisi ile oluşan kayıp J_{SC} miktarı elde edilmiştir. Kayıp J_{SC} miktarı, radyasyon öncesi ve sonrası EQE spektrumlarından hesaplanan J_{SC} değerlerinin farkı alınarak bulunmuştur. Şekil 5'te verilen kayıp J_{SC} değerleri doz miktarı arttıkça artmaktadır. Şekil 5'te verilen grafikler üzerinde yazılan doz miktarına bağlı olarak her bir hücreye ait kayıp J_{SC} miktarı 0.74 mA/cm^2 ile 1.71 mA/cm^2

arasında değişmektedir. Doz miktarı arttıkça kayıp J_{SC} miktarındaki artma, taban katmanında (p-tipi) oluşan kusurların sayısının artması ile ilişkili olup, bu durum azınlık yük taşıyıcıların elektrotlara ulaşmadan yeniden birleşme merkezlerinde birleşerek kaybolmasına atfedilmektedir [27]. Şekil 5'te verilen kayıp akım miktarları ile uygulanan ardışık doz miktarları arasındaki ilişki incelendiğinde, doz miktarı ile kayıp akım miktarı arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu durum, doz miktarı arttıkça örgü noktalarındaki atomlara enerji aktarılması sonucu oluşan kusurlarında kazandıkları kinetik enerji ile yeni kusurlar oluşturduklarına işaret etmektedir.

Farklı dozlara maruz kalmış c-Si güneş hücrelerinin normalize edilmiş EQE spektrumları Şekil 6'da verilmiştir. Radyasyona maruz kalmış her bir hücrenin EQE değerleri radyasyona maruz kalmamış değerine göre ayrı ayrı normalize edilmiştir. Normalize EQE spektrumdan da açıkça görüleceği gibi kısa dalgaboyu bölgesinde

değişimin olmadı, uzun dalgaboyu bölgede ise doz miktarına bağlı olarak spektrumda düşmenin olduğu görülmektedir. EQE sonuçlarına göre yayıcı (n-tipi) katmanın uygulanan doz miktarına göre etkilenmediği görülmektedir. Deneysel sonuçlar, radyasyon etkisinin taban (p-tipi) katmanında oluştuğunu ve bu kusurların da azınlık yük taşıyıcıların yaşam sürelerini veya difüzyon uzunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, azınlık yük taşıyıcılarının elektrotlar tarafından toplanmadan yeniden birleşme merkezlerinde birleşerek güneş hücresinin elektriksel özelliklerini olumsuz etkilemesine neden olmaktadır. Böylece, güneş hücresinin kalınlığı

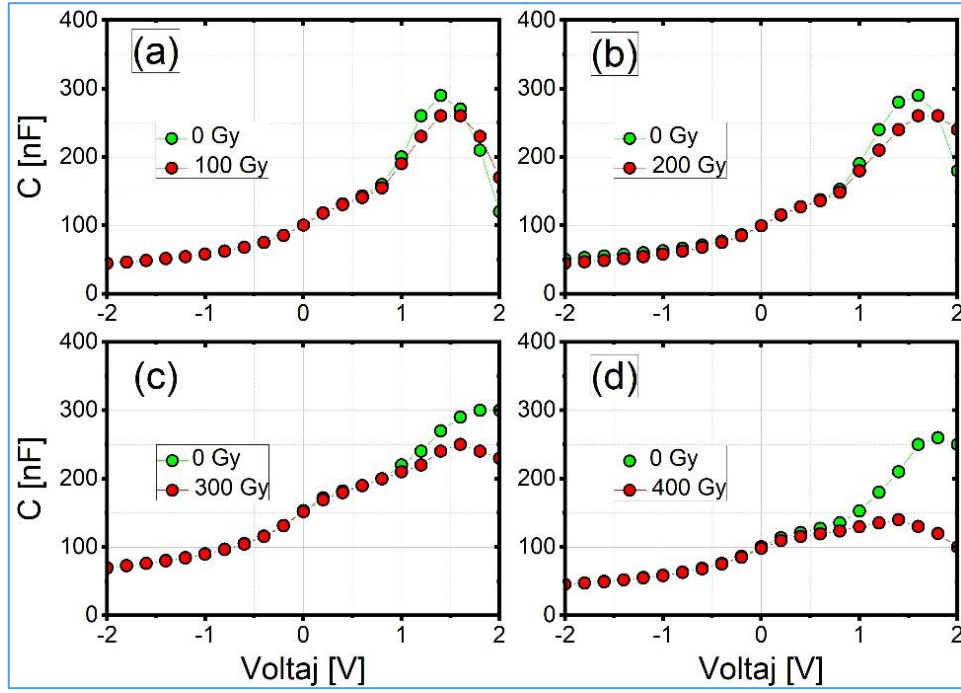
radyasyon direnci açısından önem kazanmaktadır. Çalışmada kullanılan güneş hücresinin kalınlığı 160 μm dir. Radyasyonun etkisini azaltmak veya güneş hücresinin ömrünü uzatmak için hücrelerin daha ince yapılması büyük önem kazanmaktadır. Bu şekilde, güneş hücresinin çıkış parametreleri uzun süre kararlı kalabilir. Ayrıca, hücrelerde oluşan bozulmanın zaman içerisinde tersinir olarak iyileştiğine dair literatürde çalışmalar görülmemiştir. Fakat, ısıl işlem uygulanarak güneş hücresinin çıkış parametrelerinde radyasyona uğradığı duruma göre iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir [7,8].



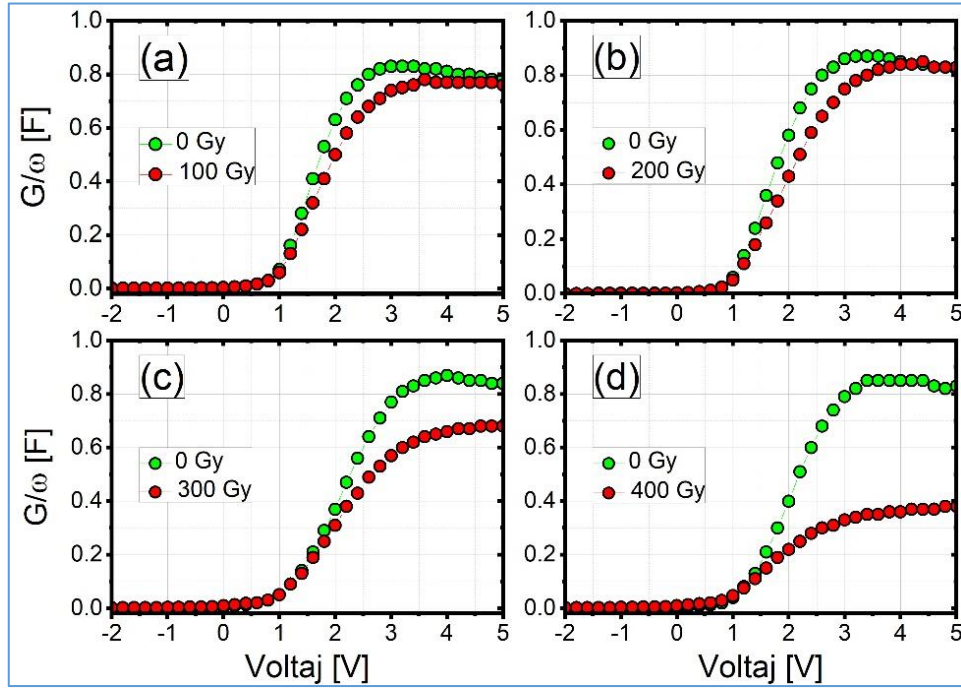
Şekil 6. Her bir güneş hücresinin normalize edilmiş EQE spektrumları (Normalized EQE spectra of each solar cell)

γ -radyasyonu öncesi ve sonrası hücrelerin karanlık koşullarda ve oda sıcaklığında alınan C-V ve G/ ω -V karakteristikleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Ölçümler 100 kHz AC sinyal kullanılarak alınmıştır. Radyasyona maruz kalmamış tüm hücreler için kapasitanslar, tükenme bölgesinin genişliği azaldıkça ve iletkenlikte ihmal edilebilir bir değişikliklerle birlikte ters bayastan (bias) ileri bayasa doğru gidildikçe artmaktadır. İletkenliğin hızla arttığı bayas voltajı başlangıcında hücrelerin kapasitansı da hızla artmaktadır. Bunun nedeni, iletkenliğin hızla arttığı bayas voltajında, azınlık yük taşıyıcısı enjeksiyonunun bir tepe değerine kadar depolama (difüzyon) kapasitansı nedeniyle hücrelerin kapasitansı hızla artmakta, daha sonra

çok yüksek taşıyıcı enjeksiyon rejiminde ise kapasitans azalırken iletkenlikte de küçük bir azalma gerçekleşir. Hücreler γ -ışınlarına maruz kaldıktan sonra, ters bayas durumunda kapasitans ve iletkenlikte değişiklik gözlenmez iken, ileri bayas durumunda ise hem kapasitans hem de iletkenlik ışınlanmamış durumlarına göre daha düşük değere sahiptir. Azınlık yük taşıyıcısı enjeksiyon veriminin radyasyon tarafından oluşturulan kusurlardan dolayı yeniden birleşmesi yoluyla azalması hem difüzyon kapasitansının hem de iletkenliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, doz miktarı arttıkça hücrelerin J_{sc} ve η değerlerindeki azalma ile de uyumlu görünmektedir.



Şekil 7. Radyasyon öncesi ve sonrası hücrelerin kapasitans-voltaj karakteristiği (Pre- and post-radiation capacitance-voltage characteristics of the cells)



Şekil 8. Radyasyon öncesi ve sonrası hücrelerin iletkenlik-voltaj karakteristiği (Pre- and post-radiation conductivity-voltage characteristics of the cells)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

c-Si güneş hücrelerinin performansı ardışık düşük doz gamma ışınlarına maruz bırakılarak incelenmiştir. Hücrelerin elektriksel ve spektral özelliğinin doz miktarına bağlı olarak kötüleştiği görülmüştür. Çıkış parametreleri olan FF ve V_{oc} yaklaşık sabit kalırken, J_{sc} ve η ise doza bağlı olarak azalmaktadır. J_{sc} 'ye bağlı olarak η değerindeki azalma, azınlık yük taşıyıcılarının yarı

ömürlerindeki veya difüzyon uzunluğundaki azalma ile ilişkilidir. EQE ölçümlerinde uzun dalga boyunda gerçekleşen bozulma, radyasyonun hücrenin taban katmanını etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, uygulanan ardışık düşük miktarı ile J_{sc} değerindeki azalma arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmüştür. Bu, hücrelerin daha ince yapılması durumunda radyasyon kaynaklı bozulmanın azalacağını ve hücrelerin kullanım sürelerinin artacağına dikkat çekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazar, güneş hücresi karakterizasyonları için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulamaları Merkezi'ne (ODTÜ-GÜNAM) ve ışınlama tesisi için Akdeniz Üniversitesi Nükleer Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (NUBA) teşekkür eder. / The author acknowledges the Middle East Technical University Solar Energy Research and Applications Center (ODTÜ-GÜNAM) for solar cell characterizations and the Akdeniz University Nuclear Research and Application Center (NUBA) for the irradiation facility.

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)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Hamache, N. Sengouga, A. Meftah, M. Henini, Modeling the effect of 1MeV electron irradiation on the performance of n⁺-p-p⁺ silicon space solar cells, Radiat. Phys. Chem. 123 (2016) 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.025>
- [2] D. Nikolić, A. Vasić-Milovanović, M. Obrenović, E. Dolićanin, Effects of successive gamma and neutron irradiation on solar cells, J. Optoelectron. Adv. Mater. 17 (2015) 351–356.
- [3] C. Pellegrino, A. Gagliardi, C.G. Zimmermann, Difference in space-charge

recombination of proton and electron irradiated GaAs solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 27 (2019) 379–390. <https://doi.org/10.1002/pip.3100>.

- [4] S.-S. Yang, X. Gao, Y.-F. Wang, Z.-Z. Feng, Displacement Damage Characterization of Electron Radiation in Triple-Junction GaAs Solar Cells, J. Spacecr. Rockets. 48 (2011) 23–26. <https://doi.org/10.2514/1.48873>.

- [5] Y. Zhang, C. Qi, T. Wang, G. Ma, H.S. Tsai, C. Liu, J. Zhou, Y. Wei, H. Li, L. Xiao, Y. Ma, D. Wang, C. Tang, J. Li, Z. Wu, M. Huo, Electron Irradiation Effects and Defects Analysis of the Inverted Metamorphic Four-Junction Solar Cells, IEEE J. Photovoltaics. 10 (2020) 1712–1720. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3025442>.

- [6] A. Vasić, P. Osmokrović, M. Vujisić, Č. Dolićanin, K. Stanković, Possibilities of improvement of silicon solar cell characteristics by lowering noise, J. Optoelectron. Adv. Mater. 10 (2008) 2800–2804.

- [7] K. Ali, S.A. Khan, M.Z. MatJafri, Improved radiation resistant properties of electron irradiated c-Si solar cells, Radiat. Phys. Chem. 125 (2016) 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.04.015>

- [8] D. Nikolić, K. Stanković, L. Timotijević, Z. Rajović, M. Vujisić, Comparative study of gamma radiation effects on solar cells, photodiodes, and phototransistors, Int. J. Photoenergy. 2013 (2013) 843174. <https://doi.org/10.1155/2013/843174>.

- [9] P.S. Bhat, A. Rao, S. Krishnan, G. Sanjeev, S.E. Puthanveetil, A study on the variation of c-Si solar cell parameters under 8 MeV electron irradiation, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 120 (2014) 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.043>.

- [10] G. Yan, J. ling Wang, J. Liu, Y. yu Liu, R. Wu, R. Wang, Electroluminescence analysis of VOC degradation of individual subcell in GaInP/GaAs/Ge space solar cells irradiated by 1.0 MeV electrons, J. Lumin. 219 (2020) 116905. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116905>.

- [11] M.R. Zdravković, A.I. Vasić, R.L. Radosavljević, M.L. Vujisić, P. V. Osmokrović, Influence of radiation on the properties of solar cells, Nucl. Technol. Radiat. Prot. 26 (2011) 158–163. <https://doi.org/10.2298/NTRP1102158Z>.

- [12] T. Hisamatsu, O. Kawasaki, S. Matsuda, T. Nakao, Y. Wakow, Radiation degradation of large fluence irradiated space silicon solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 50 (1998) 331–338. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00163-3).
- [13] X.B. Shen, A. Aierken, M. Heini, J.H. Mo, Q.Q. Lei, X.F. Zhao, M. Sailai, Y. Xu, M. Tan, Y.Y. Wu, S.L. Lu, Y.D. Li, Q. Guo, Degradation analysis of 1 MeV electron and 3 MeV proton irradiated InGaAs single junction solar cell, *AIP Adv.* 9 (2019) 075205. <https://doi.org/10.1063/1.5094472>.
- [14] C. Weiss, S. Park, J. Lefèvre, B. Boizot, C. Mohr, O. Cavani, S. Picard, R. Kurstjens, T. Niewelt, S. Janz, Electron and proton irradiation effect on the minority carrier lifetime in SiC passivated p-doped Ge wafers for space photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 209 (2020) 110430. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110430>.
- [15] J.R. Hauser, S.E. Kerns, Circuit related issues due to radiation in hostile environments, *J. Electron. Mater.* 19 (1990) 671–688. <https://doi.org/10.1007/BF02655236>.
- [16] F. Es, M. Kulakci, R. Turan, An Alternative Metal-Assisted Etching Route for Texturing Silicon Wafers for Solar Cell Applications, *IEEE J. Photovoltaics.* 6 (2016) 440–446. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2520207>.
- [17] M. Kulakci, F. Es, B. Ozdemir, H.E. Unalan, R. Turan, Application of si nanowires fabricated by metal-assisted etching to crystalline si solar cells, *IEEE J. Photovoltaics.* 3 (2013) 548–553. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2228300>.
- [18] Y. Zhang, H. Zhang, B. Yu, W. Wang, R. Hou, B. Chen, Q. Xu, Y. Zhou, G. Qin, Gamma-ray irradiation hardness of arrayed silicon microhole-based radial p-n junction solar cells, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 (2014) 065101. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/6/065101>.
- [19] D.M. Tobnaghi, A. Rahnamaei, M. Vajdi, Experimental Study of Gamma Radiation Effects on the Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells, *Int. J. Electrochem. Sci.* 9 (2014) 2824–2831.
- [20] A.M. Saad, Effect of cobalt 60 and 1 MeV electron irradiation on silicon photodiodes/solar cells., *Can. J. Phys.* 80 (2002) 1591–1599. <https://doi.org/10.1139/p02-037>.
- [21] V. Aubry, F. Meyer, Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward I-V methods, *J. Appl. Phys.* 76 (1994) 7973–7984. <https://doi.org/10.1063/1.357909>.
- [22] M. Ashry, S. Fares, Diffusion length analysis and measurement in the base region of photodiodes, *J. Phys. Chem. Solids.* 64 (2003) 2429–2431. [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(03\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(03)00285-3).
- [23] J. Kuendig, M. Goetz, A. Shah, L. Gerlach, E. Fernandez, Thin film silicon solar cells for space applications: Study of proton irradiation and thermal annealing effects on the characteristics of solar cells and individual layers, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 79 (2003) 425–438. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00486-5).
- [24] D.M. Tobnaghi, R. Madatov, Recovery in the electrical parameters of the aging silicon solar cells by annealing, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 16 (2014) 764–768.
- [25] Y. Morita, T. Ohshima, I. Nashiyama, Y. Yamamoto, O. Kawasaki, S. Matsuda, Anomalous degradation in silicon solar cells subjected to high-fluence proton and electron irradiations, *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 6491–6493. <https://doi.org/10.1063/1.364437>.
- [26] A. Vasić, M. Vujisić, B. Lončar, P. Osmokrović, Aging of solar cells under working conditions, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 9 (2007) 1843–1846.
- [27] D. Nikolic, A. Vasic-Milovanovic, Comparative study of gamma and neutron irradiation effects on the silicon solar cells parameters, *FME Trans.* 44 (2016) 99–105. <https://doi.org/10.5937/fmet1601099N>.

Şebekeye Bağlı Dağıtık Üretim Sistemleri için Akıllı Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin İncelenmesi

Asiye KAYMAZ ÖZCANLI^{1,*} 

¹Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 34445, Beyoğlu/İSTANBUL

Article Info

Research article
Received: 27/10/2022
Revision: 16/04/2023
Accepted: 16/04/2023

Keywords

Islanding
IDM
DG
Microgrid
NDZ

Makale Bilgisi

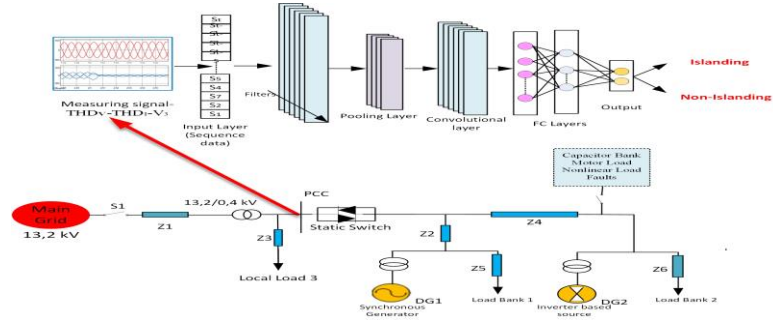
Araştırma makalesi
Başvuru: 27/10/2022
Düzeltilme: 16/04/2023
Kabul: 16/04/2023

Anahtar Kelimeler

Ada Çalışma
Ada Çalışma Yöntemleri
Dağıtık Üretim
Mikro şebeke
Algılama Dışı Bölge

Grafik Özet /Graphical/Tabular Abstract

Bu çalışmada, literatürde sunulan akıllı ada çalışma tespit yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve önerilen yöntemler algılama dışı bölge, tespit süresi, işletme maliyeti, doğruluk ve güç kalitesi bakımından analiz edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, önerilen yöntemlerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla detaylı olarak incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur. / In this study, intelligent islanding detection methods is presented in the literature and the methods are analyzed in terms of NDZ, detection time, computational cost, accuracy and power quality. Unlike other reviews, real time simulations of islanding detection are examined to assess applicability of the proposed methods. Furthermore, the review article is an important reference resource for researchers.



Resim A: Akıllı Yöntemlere Dayalı Ada Çalışma Tespiti Örneği/ Figure A: Islanding Detection Based on Intelligent Methods

Önemli noktalar (Highlights)

- Mikro şebekelerde ve dağıtık üretimlerde ada çalışmanın temel prensipleri aktarılmıştır. / Islanding detection standards and criteria are presented in distributed generation and microgrids.
- Yapay zekaya dayalı ada çalışma yöntemleri incelenmiştir. / Intelligent islanding detection methods are presented.
- Ada çalışmaya bağlı yöntemlerin uygulanabilirliği gerçek zamanlı simülasyonu yapılan çalışmalar üzerinden tartışılmıştır. Applicability of the proposed methods are discussed on real time simulations and hardware in the loop systems.

Amaç (Aim): Literatürdeki akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit yöntemlerinin önemli noktalarını ortaya koymak ve karşılaşılan zorluklara getirilen çözümleri incelemektir. / The aim of the study is to present intelligent islanding detection methods in the literature and to investigate the solutions for challenges.

Özgünlük (Originality): Ada çalışma tespit yöntemlerinin uygulanabilirliği gerçek zamanlı simülasyon çalışmaları üzerinden değerlendirilmiştir. / The applicability of the islanding detection methods survey on real time hardware in the loop systems.

Results (Bulgular): Akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metotları geleneksel metotlara göre hızlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir. / Intelligent islanding detection methods demonstrate high accuracy and fast detection speed according to conventional methods.

Sonuç (Conclusion): Literatürde yapay zekaya dayalı çok sayıda yöntem önerilmekle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunun artmasıyla daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. / In recent years, many intelligent islanding detection methods have been presented in the literature. Novel methods are needed due to the rapid integration of renewable energy resources to power system.



Şebekeye Bağlı Dağıtık Üretim Sistemleri için Akıllı Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin İncelenmesi

Asiye KAYMAZ ÖZCANLI^{1,*}

¹Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 34445, Beyoğlu/İSTANBUL

Article Info

Research article
Received: 27/10/2022
Revision: 16/04/2023
Accepted: 16/04/2023

Keywords

Islanding
IDM
DG
Microgrid
NDZ

Öz

Mikro şebekeler fotovoltaik, rüzgâr ve hidrolik gibi enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu sağlayan ve şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız çalışabilen, geleceğin enerji sisteminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Mikro şebeke konsepti; fosil yakıt kullanımı, hat kayıpları, karbon ayak izi, emisyon azaltma ve enerji verimliliğini artırma hedefi ile geleceğin akıllı şebekeleri için büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte dağıtık üretimin güç sistemine entegrasyonu, güç sisteminin kontrolü işletilmesi ve korunmasında bazı dezavantajlara ve risklere neden olabilmektedir. Bu konudaki en büyük problemlerden biri, şebekeye bağlı çalışan mikro şebekenin herhangi bir arıza durumunda ana şebekeden ayrılarak çalışmaya devam ettiği istenmeyen ada çalışma durumudur. İstenmeyen ada çalışma durumu, güç sisteminde frekans kararsızlığına neden olarak, personel güvenliği ve güç sistemindeki ekipmanları için tehdit unsuru oluşturabilir. Bu durumu önlemek amacıyla ada çalışmanın ivedilikle tespit edilerek ana şebeke ile mikro şebekenin bağlantısı fiziksel olarak kesilmelidir. Literatürde birçok ada çalışma tespit yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada, literatürde sunulan akıllı ada çalışma tespit yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve önerilen yöntemler algılama dışı bölge, tespit süresi, işletme maliyeti, doğruluk ve güç kalitesi bakımından analiz edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, önerilen yöntemlerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla detaylı olarak incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur.

A Comprehensive Review of Intelligent Islanding Detection Methods for Grid Integrated Distributed Generation Systems

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/10/2022
Düzeltilme: 16/04/2023
Kabul: 16/04/2023

Anahtar Kelimeler

Ada Çalışma
Ada Çalışma Yöntemleri
Dağıtık Üretim
Mikro şebeke
Algılama Dışı Bölge

Abstract

Microgrid is an important part of the modern power system, which integrates renewable energy sources such as photovoltaic, wind and hydro into the grid and can operate both grid connected and stand-alone mode. Microgrid concept has great potential for smart grid with the aim of fossil fuel use, line losses, decarbonization, and increasing energy efficiency. However, the integration of distributed generation into the power system may cause some disadvantages and risks in the operation, control and protection of the power system. One of the most important problems is the unintentional islanding situation, in which the micro grid operates by disconnecting from the main grid in case of any failure. Unintentional islanding can cause instability frequency in the power system and threat to personnel safety and equipment. To overcome this situation, islanding must be detected immediately and microgrids must be electrically separated from the main utility network. There are many islanding detection methods in the literature. In this work, intelligent islanding detection methods are presented in a comprehensive review and the proposed methods are extensively analyzed in terms of non-detection zone, detection time, applicability in multi-DG systems, accuracy, and power quality. Unlike other studies, real-time experimental studies are examined to demonstrate the applicability of the proposed methods. Hence, the review will be a vital guideline for researchers and field engineering.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya üzerinde yaşanan enerji krizleri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı gün geçtikçe arttırmaktadır. Rusya ve Ukrayna arasında başlayan savaş nedeniyle Avrupa'da meydana gelen

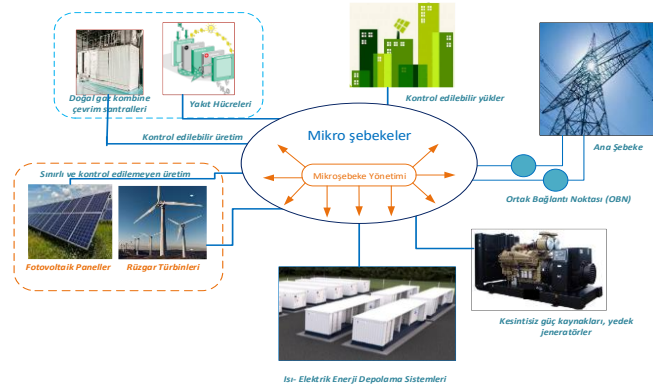
doğalgaz krizi bu ihtiyacın ne kadar önemli olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu kriz sonrası uluslararası enerji ajansı (IEA) tarafından Rus gazının kullanımının azaltılmasına

yönelik on maddelik eylem planı hazırlanmıştır. Bu rapordaki maddelerden birinde ise rüzgâr ve güneşe bağlı kuruluşların hızlandırılmasıyla elde edilecek 35 TWh'lik enerji üretimiyle yıllık on milyon metre küplük gaz kullanımının azaltılabileceği belirtilmiştir [1]. Diğer yandan artan bu enerji üretiminin diğer yandan mevcut şebekeye bağlantısının önceden planlanarak ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm üretilmesi gerekmektedir. Elektrik enerji sistemine dağıtık üretilere (DÜ) bağlı enerji kaynaklarının da katılması mevcut sistemi yapısal olarak değiştirmektedir. Dağıtık sistemlerin bireysel olarak kullanılması işletme, koruma ve kontrol açısından birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir. Bunun yerine farklı DÜ'lerin bir arada bulunduğu yükleri ve depolama sistemlerini içinde barındıran, gerektiğinde otonom olarak şebeke ile paralel veya şebekeden bağımsız çalışabilen mikro şebeke kavramı ortaya çıkmıştır [2]. Mikro şebekeler; sınırlı ve kontrol edilemeyen rüzgâr ve güneş gibi DÜ'leri, üretimi kontrol edilebilen yakıt hücreleri, doğal gaz kombine çevrim santralleri bunun yanı sıra yedek güç üniteleri, enerji depolama sistemleri, elektrikli araç şarj istasyonları, kontrollü ve kontrolsüz yükleri içinde barındırabilir. Ayrıca mikro şebekeler kojenerasyon santralleri, dizel jeneratörler gibi DÜ'leri bünyesinde bulundurabilir ve ısı enerjisinden yararlanılarak üretilen enerjilerle verimliliği arttırabilir. Şekil 1'de örnek bir mikro şebeke konsepti gösterilmiştir. Acil durum yüklerine yedek güç sağlayan jeneratörlere benzer şekilde, mikro şebekeler de DÜ'lerin yük talebine daha yakın kurularak tüketici yüklerini beslemek için kullanılır. Bu sayede hat kayıplarını azaltmada ve sistemin verimliliğini arttırmada önemli etkiye sahiptirler. Mikro şebekelerin dağıtım şebekesine entegre edilmesi güç sisteminde ekonomik, süreklilik ve güvenilirlik açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte geleneksel şebeke sisteminin yapısal olarak değişmesi, mevcut güç sisteminin işletme, kontrol ve koruma mekanizmalarını devre dışı bırakmaktadır [3]. Koruma sistemi için ortaya çıkan en önemli problemlerden biri istenmeyen ada çalışma durumudur. Ada çalışma, şebeke ile paralel çalışan

DÜ'lerin herhangi bir sebeple şebekeden ayrılarak yerel yükleri beslemeye devam ettiği durumdur. Bu durum istemli veya istemsiz olarak meydana gelebilmektedir. Güç sisteminde bakım onarım gibi önceden planlanarak DÜ'lerin ana şebeke ile bağlantısının kesilmesi, istemli ada çalışma, beklenmedik olaylar sebebi ile DÜ'lerin aniden şebekeden ayrılması, istemsiz ada çalışma olarak tanımlanır. İstenmeyen bir ada çalışmaya geçiş düzensiz bir çalışmaya sebep olarak gerilim, frekans ve diğer güç sistemi parametreleri kabul edilmeyen limitlere sahip olabilmektedir. İstenmeyen ada çalışma durumu, güç sisteminde ana şebeke tarafında meydana gelen herhangi bir arıza, gerilim ve frekans değerlerinde herhangi bir nedenle meydana gelecek kabul edilemeyen değerlerin olması durumunda meydana gelebilir.

Bu çalışmada DÜ'lerin şebekeye entegrasyonunda meydana gelebilecek en önemli problemlerden biri olan istenmeyen ada çalışma durumu incelenmiştir. Bu amaçla ada çalışmaya neden olan durumlar, ada çalışma durumunda ortaya çıkabilecek problemler ve bu problemleri ortadan kaldırmak amacıyla önerilen ada çalışma tespit yöntemleri sırasıyla detaylandırılmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer ada çalışma tespit yöntemini inceleyen makalelerden farkını şu şekilde özetleyebiliriz. İlk olarak incelenen makaleler son yıllarda ortaya konulan farklı ve güncel çalışmalardan derlenmiştir. İkinci olarak literatürde önerilen ada çalışma yöntemleri çok sayıda performans kriteri göz önüne alınarak kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Son olarak olarak laboratuvar ortamında uygulaması yapılan ada çalışma tespit yöntemleri ayrı bir bölümde detaylı şekilde incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci kısmında ada çalışma standartları ve kriterleri, üçüncü kısmında ada çalışma tespit metotları, dördüncü kısmında ada çalışma tespit yöntemlerinin gerçek zamanlı uygulama çalışmaları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise beşinci kısımda değerlendirilmiştir.



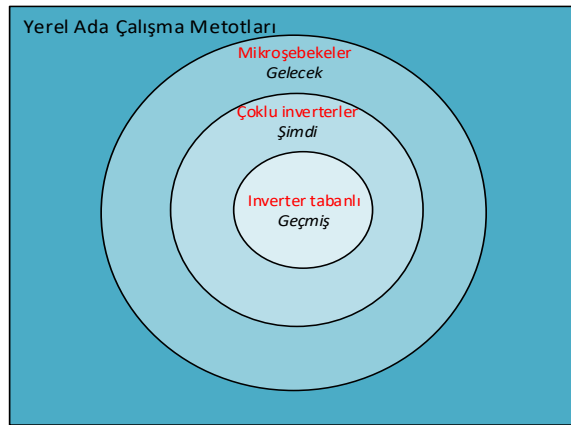
Resim 1. Mikro Şebekeler (Microgrids)

2. ADA ÇALIŞMA STANDARTLARI ve KRİTERLERİ (ISLANDING DETECTION STANDARDS AND CRITERIA)

Ada çalışma tespit metotları zaman içinde değişerek ihtiyaç durumuna göre farklı amaçlar için oluşturulmuştur. Geçmişten günümüze ada çalışma tespit metotlarını Şekil 2’de gösterilen sistemler için sınıflandırmak mümkündür. Bu üç farklı kategoriye ait oluşturulan yerel ada çalışma metotları farklı sistem bileşenlerini içermektedir ve bu da her bir kategori için önerilen çözümleri farklı kılmaktadır [4]. Geçmişte sunulan ada çalışma tespit yöntemleri inverter kaynaklı tek bir DÜ’nün bulunduğu eski sistemler için önerilmiştir. Başlangıçta tek inverter kaynaklı güneşe bağlı DÜ’ler için herhangi bir istenmeyen ada çalışma durumunda önceden belirlenen bir süre zarfında ada çalışma tespit

edilerek dağıtık kaynağının kapatılması planlanmıştır. Son yıllarda ise yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin giderek artması mikro şebeke gibi sistemlerin yaygınlaşması ile ada çalışma durumunda bile dağıtık kaynakların yerel yükleri beslemeye devam etmesi istenmektedir. Bu da geçmişte önerilen çözümlerin etkisiz kalmasına sebep olmuştur.

Yenilenebilir enerjideki şebeke entegrasyonunun artması ve birden çok inverter kaynaklı DÜ’lerin birlikte kullanımı yeni ada çalışma tespit yöntemlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında birden fazla inverterin bulunduğu durumlar için önerilen yöntemlerin büyük çoğunluğu her bir inverter kaynağın çıkışındaki duruma dayalı tespit yapmaktadır [5].



Şekil 2. Yerel ada çalışma tespit yöntemlerinin geçmişten günümüze hiyerarşisi [2] (The hierarchical of islanding detection methods)

Bu sistem gerçek mikro şebekeler için efektif bir çözüm sunamamaktadır. Şekil 3’te farklı kaynaklardan oluşan, statik anahtarlı mikro şebeke örneği ile gösterilmiştir. Statik anahtar sayesinde akıllı ada çalışma tespit yöntemleri, ada çalışmaya geçişteki belirlenen kontrol algoritmaları ve koruma metotları uygulanabilmektedir. Bu örnekte ortaya

konulan ada çalışma tespit metotları DÜ’lerin çıkışlarındaki ölçümlerden ziyade ana şebekenin ortak bağlantı noktasındaki (OBN) ölçümler dikkate alınarak uygulanmaktadır. Bu sayede tek bir noktadan alınan ölçüm ile uygulaması ve maliyeti daha düşük ada çalışma yöntemi elde edilmektedir.

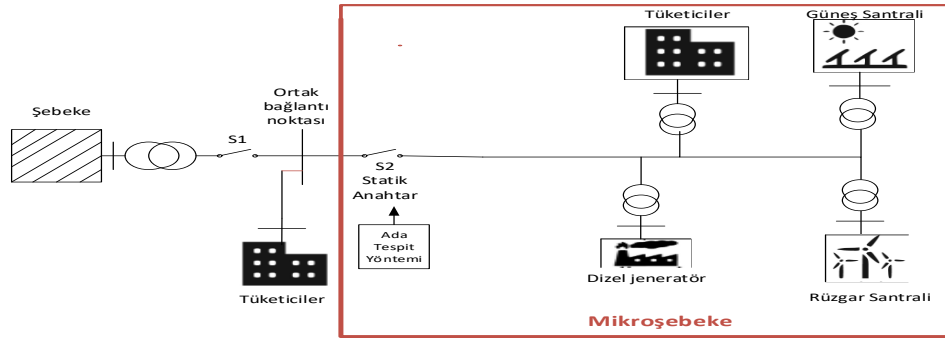
Ada çalışmanın mümkün olduğu kadar hızlı şekilde tespit edilmesi aşağıdaki nedenlerden dolayı hayati önem taşımaktadır.

- DÜ'lerin ada çalışma durumunda hala devrede olması nedeniyle hat üzerindeki enerji herhangi bir hat bakım işçisinin güvenliği açısından tehlike oluşturabilir.
- Ada çalışma durumunda şebekedeki gerilim ve frekans kontrolünün kaybedilmesi sonucu tüketici makineleri ve ekipmanlarına ciddi zarar meydana gelebilir.
- Gerilim ve frekans seviyelerinin korunamaması durumunda DÜ kaynaklarında ve diğer ekipmanlarda bozulmalara sebep olabilir.

Mikro şebekeler başlığı altında bu konuda geliştirilen ortak bir standart bulunmamaktadır. Bununla birlikte bazı ülkeler ve kuruluşlar bu konuda kendi test sistemlerini oluşturup belirli test standartlarına göre ada tespitinin esnekliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu uluslararası standartlardan bazıları IEEE Std. 1547-2003, IEC 62116, UL 1741, Kore standartıdır. Ortaya konulan standartlarda müsaade edilen frekans ve gerilim aralığı ile maksimum ada tespit süresi Tablo 1'de verilmiştir [6]. IEEE 1547-2003 standardına göre herhangi bir ada çalışma durumu 2 saniyeden kısa sürede tespit edilmeli ve şebeke ile dağıtık üretim arasındaki fiziksel bağlantı kesmek için röleye sinyal göndermelidir. Geliştirilen

yöntem ada çalışmayı diğer şebeke bozukluklarından ayırt etmeli ve DÜ'nün şebeke ile bağlantı durumunu, güç kalitesini, ekipman zararını, frekans ve voltaj kararsızlığını gözetmelidir. Bu konuda ortaya konulan sınırlı sayıda çalışma olup en önemlisi IEEE-1547 numaralı standardıdır ve özellikle mikro şebeke için eksiklikler barındırmaktadır [7]. Bu da önerilen yöntemlerin test edilmesini ve uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır.

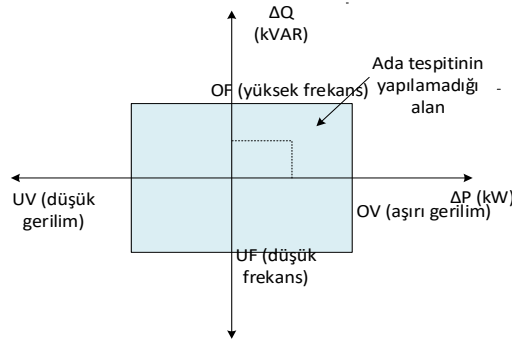
Ada çalışma tespit yönteminde değerlendirilen başlıca performans kriterleri bulunmaktadır [6]. Ada çalışmanın tespit edilemediği alan literatürde ADB olarak isimlendirilmiş ve ada çalışmanın meydana geldiği halde tespit edilemediği bölgeyi ifade etmiştir [8]. Bu bölge, DÜ ile yerel yük tüketimi arasındaki güç uyumsuzluğu ile ilgilidir. OBN'deki aktif güç değişimi (ΔP) ve reaktif güç değişimi (ΔQ) yani üretilen güç ile tüketilen güç arasındaki fark ada çalışmanın tespit edilemediği alanı hesaplamak için kullanılan birer kriterdir. Üretim ve tüketim arasındaki fark sıfıra yaklaştıkça OBN'de gerilim, akım, frekans gibi büyüklüklerdeki değişim küçüldüğünden ada çalışmayı tespit etmek güçleşir. Şekil 4'te aşırı ve düşük gerilim, alçak ve yüksek frekans örneğinde ADB örnek olarak gösterilmiştir. Ada çalışma tespiti üretilen aktif ve reaktif gücün yükler tarafından tamamen tüketildiği en kötü durumda bile yapılabilir. İyi bir ada çalışma tespiti için ADB'nin mümkün olduğunca düşük olması istenir.



Şekil 3. Mikro şebekede ada çalışma durumu (Islanding detection of microgrids)

Tablo 1. Ada Tespitinde Kullanılan Standartlar (Standards of Islanding Detection Methods)

Parametreler	IEEE Std. 1547-2003	IEEE Std. 929-2000	IEC 62116
Kalite Faktörü	1	2,5	1
Ada Tespit Süresi (t)	$t < 2$ s	$t < 2$ s	$t < 2$ s
Frekans aralığı	$59.3 \leq f \leq 60.5$ Hz	$59.3 \leq f \leq 60.5$ Hz	$f_0 - 1.5 \text{ Hz} \leq f \leq f_0 + 1.5 \text{ Hz}$
Gerilim aralığı	$0.88 \leq V \leq 1.10$	$0.88 \leq V \leq 1.10$	$0.85 \leq V \leq 1.15$



Resim 4. Ada Çalışmanın Tespit Edilemediği Bölge (ADB) (None Detection Zone (NDZ))

Ada çalışma tespit yönteminin performansını belirleyen bir diğer kriter ise tespit süresidir. Bu süre mikro şebekenin ana şebekeden ayrılmasının ardından ada çalışmanın tespit edildiği ana kadar geçen zamanı ifade eder. Önerilen yöntemin efektif olabilmesi için bu sürenin de oldukça düşük olması gerekir. IEEE 1547-2003, IEC 62116 gibi standartlarda bu sürenin 2 saniye değerinin altında olması gerektiği belirtilmiştir [7]. Bu süre ne kadar kısa olursa plansız ada çalışma durumlarında sistemin tekrar senkronizasyonun sağlanması o kadar kolay gerçekleştirilir.

Hatalı tespit, mikro şebekenin ana şebeke ile bağlantısının devam ettiği halde ada çalışma tespit edilememesi durumu ifade eder. Bu durum ise yükün kapatılıp açılması veya diğer şebeke arızaları durumunda belirlenen parametreler normal sınırları aştığı için yaşanır. Güç kalitesine etki ada çalışma performansını etkileyen bir diğer faktördür. Bazı yöntemlerde sisteme verilen enjekteler güç çıkışını bozmakta ve kalitesini kötüleştirmektedir.

Son olarak ada çalışma tespit yöntemi değerlendirilirken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta sadece birden fazla DÜ için değil farklı tipte DÜ'leri içeren sistemler için de uygulanabilir ve esnek olmasıdır. Bunun yanı sıra mevcut sistem topolojisinin değişmesi durumunda da ada çalışmayı tespit edebilecek kapasiteye sahip olmalıdır. Yukarıdaki performans değerlendirmeleri şu şekilde özetlenebilir.

- Düşük ADB' ye sahip olmalı
- Yüksek hızda tespit yapabilmeli
- Farklı tipte DÜ'ler için uygulanabilmeli
- Uygulama maliyeti düşük olmalı
- Güç kalitesine olumsuz etkisi olmamalı

Dimensional measurements of keyseats obtained after the experiments were made with Global Classic 091508 model coordinate measuring machine (CMM). Before the measurements, the

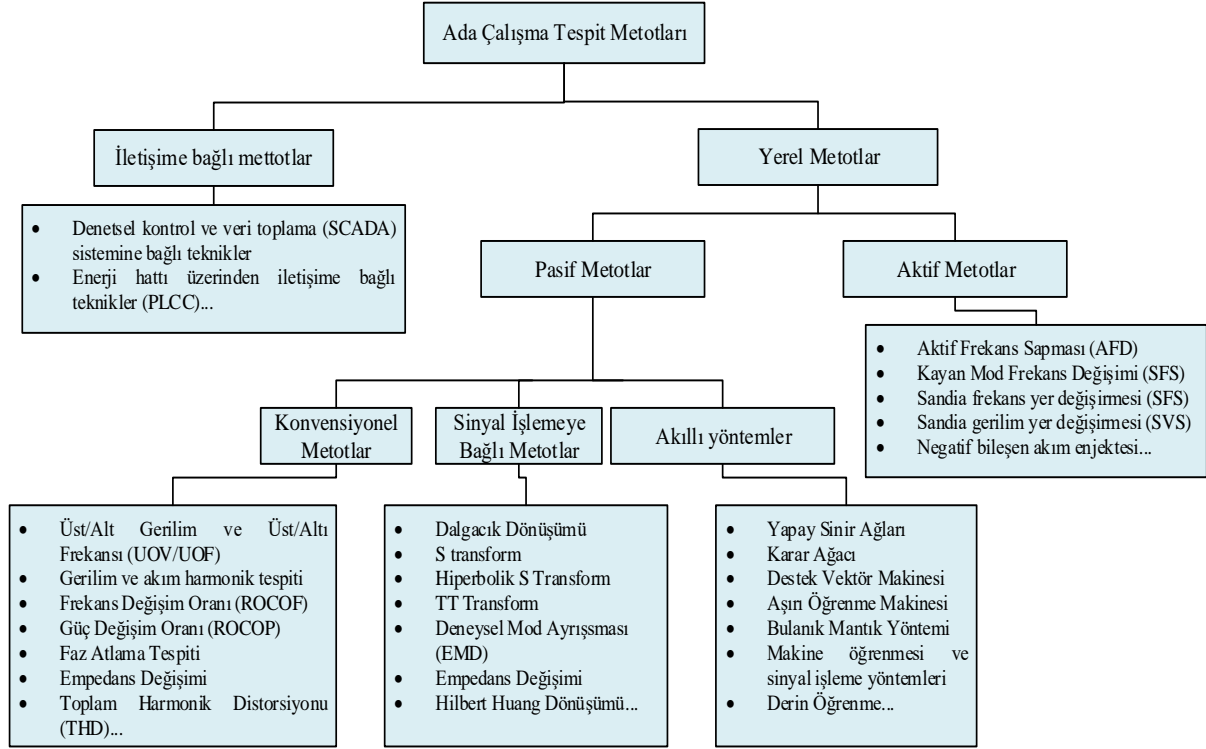
calibration process was performed at the angle of A90B-90. The plane formed from the ground surface of the workpiece was leveled and the position of the workpiece was fixed by verifying with the "line" formed from one side of the keyseat. "t1" measurement results were obtained by calculating the plane on the ground and the extreme point of the outer diameter. The "b" measurement results were obtained with the lines obtained by contacting two points on the side surfaces of the keyseat. Radius (R) measurements were obtained with circles created by touching three points, and the distance measurement between the circles and the "L" dimension were checked. Perpendicular to the ground "line" was formed from the side walls of the keyseat, and perpendicularity checks were made with the plane on the floor. All calibration and measurement processes were carried out at 21°C. The experimental setup and workflow are shown in Figure 3.

3. ADA ÇALIŞMA TESPİT YÖNTEMLERİ (ISLANDING DETECTION METHODS)

Ada çalışma tespit yöntemlerinin temel amacı şebeke ve DÜ tarafındaki bazı elektriksel parametrelerin izlenerek ada çalışmanın meydana gelip gelmediğini tanımlamaktır. Ada çalışma yöntemleri literatürde iletişime bağlı yöntemler ve yerel yöntemler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. İletişime bağlı metotlar, elektrik şebeke seviyesinde operatör tarafından ada bilgisi ve röle kontrolü, merkezi denetleme kontrol ve veri toplama (SCADA) gibi iletişim sistemleri ile izlenerek yapılır. Bu metotlar en esnek yöntemlerdir ve sıfır ADB' ye sahiptir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı şebekeye uygulamasında yüksek maliyete sahip olmasıdır. Bu yöntem birden fazla inverter bağlı yüksek güçlü DÜ'ler için çok elverişli olsa da mikro şebeke gibi küçük sistemler için ekonomik olarak uygun değildir. Yerel yöntemlerde ada çalışma tespiti için kullanılan sistem parametreleri OBN'den veya DÜ

kaynaklarının çıkışındaki yerel ölçümlerden elde edilir. Bu yöntemler ise kendi arasında aktif, pasif yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Literatürde ayrıca aktif ve pasif yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek amacıyla bu yöntemler birlikte kullanılmış ve hibrit yöntem ismiyle sunulmuştur [9],[10]. Bazı çalışmalarda ise akıllı yöntemler ile

sinyal işlemeyle ilgili yöntemler birleştirilerek ada çalışma tespit edilmiştir [11],[12]. Şekil 5'te bazı ada çalışma tespit yöntemleri sınıflandırılmıştır. Bu yöntemlerin temel özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler bir sonraki bölümde incelenmiştir. Tablo 2'de ise bu sınıfların avantaj ve dezavantajları verilmiştir.



Şekil 5. Ada çalışma tespit metotları (Islanding Detection Methods)

Tablo 2. Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Islanding Detection Methods)

	Referans	Metotlar	Dağıtık Sistem	Avantajları	Dezavantajları
Uzaktan Metotlar	[13], [14]	SCADA, PLCC, transfer trip	Çoklu DÜ'ler	Yüksek doğruluk, hızlı tespit, etkili, güvenilir, gerçek zamanlı kontrol, güç kalitesini etkilemez	Kompleks, maliyeti yüksek, büyük güçlü sistemler için uygun
Geleneksel Pasif Metotlar	[15]	UVP/OVP	İnverter DÜ	Hızlı, uygulama kolaylığı	Eşik değer belirleme, geniş ADB
	[16]	UFP/OFP	İnverter DÜ		
	[17]	ROCOF	Senkron DÜ		
Aktif Metotlar	[18],[19]	Harmonik ölç.	İnverter DÜ	Sıfır ADB, yüksek doğruluk, uygulama kolaylığı	Güç kalitesine olumsuz etki
	[20],[21]	Reaktif güç enjektörü	İnverter DÜ		
	[22],[23]	Sandia frekans yer değiştirmesi	İnverter DÜ		

3.1. İletişime Dayalı Metotlar (Communication Methods)

Uzaktan metotlarda ana şebeke ile DÜ'ler arasında haberleşme sinyalleri kullanılır [14]. Yöntem ada çalışma tespiti için kesin ve etkili çözümler sunmaktadır. En önemli avantajı sıfır ADB'ye sahip olması ve güç kalitesini etkilememesidir. Bununla birlikte iletişim altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tek DÜ'nün bulunduğu düşük güçlü dağıtım sistemleri için kurulum maliyeti yüksektir [24]. Bu yöntem temel olarak enerji hattı iletim sistemi (PLCC) [25] ve denetsel kontrol ve veri toplama (SCADA) [13] sistemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bazı çalışmalarda fazör ölçüm üniteleri (PMU) kullanılarak DÜ'ler ve ana şebeke arasındaki veri transferi ile DÜ'ler şebekeden izole edilmiştir [9],[5]. Bir diğer ada çalışma tespiti rüzgâr ve güneşe bağlı DÜ'lerin bulunduğu bir sistemde devre kesicilerin merkezi bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmesiyle daha düşük maliyetle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde devre kesiciler gerçek zamanlı olarak önceden belirlenen frekans, akım ve gerilim eşik değerleri dikkate alınarak kontrol edilmiştir [14].

3.2. Aktif Metotlar (Active Methods)

Aktif yöntemde, sisteme ilave bir sinyal enjektisi edilerek meydana gelen değişimler izlenmekte ve böylece olağan dışı durumlar tespit edilerek ada çalışma tespit edilmektedir. Bu tespit sistemi etkili sonuçlar vermesine rağmen hem maliyet açısından hem de uygulama yönünden çeşitli zorluklara sahiptir. Ayrıca sisteme dışarıdan enjekte edilen sinyaller güç kalitesinin bozulmasına sebep olabilmektedir. Birden fazla DÜ'nün olduğu durumlarda ise enjekte edilen sinyallerin karşılıklı etkileşimi nedeniyle yanlış açmalara sebep olabilmekte ve sistem kararlılığında bozucu etkiye neden olabilmektedir. Aktif metotlar pasif metotlara göre yüksek güvenilirliğe rağmen tespit süreleri bazı pasif metotlara göre daha yavaştır [26]. Hem senkron hem de inverter bazlı dağıtım sisteminin bir arada bulunduğu mikro şebeke modeli için ada çalışma tespiti önerilmiş, sisteme enjekte edilen harmonik sinyal ile sistemdeki gerilim değişimi ve frekans izlenerek ada çalışma tespiti yapılmıştır [27]. Diğer bir makalede ise OBN'de ölçülen gerilim değişimi kontrol edilerek aktif ada tespit yöntemi önerilmiş ve sadece inverter kaynaklı DÜ'nün olduğu mikro şebeke için uygulanmıştır

[28]. Bu yöntemin sağladığı en büyük avantaj, ADB'yi neredeyse sıfıra kadar indirebilmeleri ve düşük hata oranı sağlamasıdır. Bunun yanında şebekeye ilave bir sinyal aktarıldığından güç kalitesini etkilemesi kaçınılmazdır. Ayrıca ilave güç elektroniği ekipmanlarına ihtiyaç duyulur ve uygulanması pasif metotlara göre daha karmaşıktır.

3.3. Pasif Metotlar (Passive Methods)

Pasif yöntemde ana şebeke ile mikro şebeke arasında bulunan OBN'de ölçülen elektriksel parametreler (akım, gerilim, güç, frekans, harmonik bozunum...) kullanılarak ada çalışma tespit edilir [29]. Geleneksel pasif ada çalışma tespit yöntemlerinde önceden belirlenen bir eşik değer ile bu ölçülen değerler karşılaştırılıp normal olmayan bir durumda röleye açma sinyali gönderilir. Bu yöntemin dikkat çeken özellikleri uygulama kolaylığı ve güç kalitesini etkilememesidir. Şekil 6'da bu sistemin şematik gösterimi yer almaktadır. Geleneksel yöntemlerin geniş bir ADB'ye sahip olması, eşik değer belirleme zorluğu ve sistemdeki düşük aktif reaktif dengesizliğinde ada çalışma tespitinin başarısız olması gibi eksiklikleri bulunmaktadır. Ada çalışmayı tespit edebilecek parametrelerin belirlenmesi bu yöntemin zorluklarından biridir. Diğer bir konu ise eşik değere bağlı yöntemlerde doğru eşik değer limitlerinin belirlenmesidir. Bu eşik değer hem düşük güç değişimleri için uygun olmalı hem de ada olmayan olayları ayırt edebilmelidir. Şebekede meydana gelen ada olayları bazı geçici hal karakteristikleri ile benzer karakteristiğe sahip olabilmektedir, bu da röleye yanlış açma sinyali vermektedir. Pasif ada tespit yöntemlerini de kendi içerisinde konvensiyonel metotlar, sinyal işlemeye bağlı metotlar ve akıllı metotlar olarak sınıflandırılmaktadır. Konvensiyonel metotlarda akım, gerilim, frekans, toplam harmonik bozunum (THD) gibi parametreler izlenip ada çalışma tespitine uygun bir algoritma belirlenerek, herhangi bir akıllı yöntem kullanmadan önce belirlenen eşik değere göre ada çalışma tespit edilmektedir. Sinyal işlemeye dayalı metotlarda güç sistemindeki akım veya gerilime bağlı sinyaller farklı matematiksel metotlar ile çeşitli formlara dönüştürülür ve bu dönüştürülen sinyaller ada çalışmanın meydana gelip gelmediğini tespit etmede kullanılır. Fourier analizi, S-Dönüşüm, Dalgacık Dönüşümü en yaygın olarak kullanılan sinyal işleme metotları olarak gösterilebilir [30]. Akıllı metotlar ise genellikle

yapay zekâ yöntemlerinden faydalanılarak elektriksel parametrelerin farklı algoritmalar ile eğitilmesiyle oluşturulur. Hali hazırda elektrik güç sistemlerinde ortaya çıkan problemlerin çözümü için güç sistemlerinin işletilmesi, planlanması, kontrolü gibi konularda yapay zekaya başvurulmaktadır [31],[32]. Son yıllarda veri setinden güç sistem özelliklerini analiz eden akıllı yöntemler ada çalışmayı tespit etmek için de kullanılmıştır. Bu yöntemler detaylı olarak bir sonraki bölümde incelenmiştir [33].

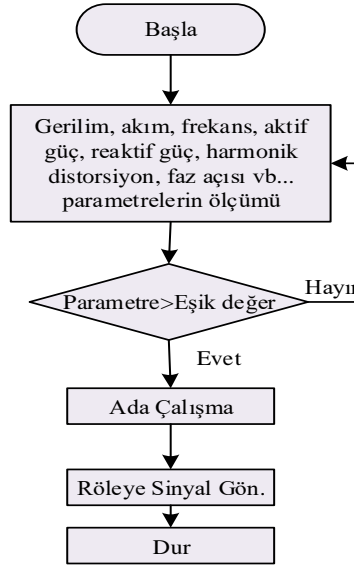
3.3.1 Konvansiyonel Metotlar (Conventional Methods)

Literatürde en yaygın kullanılan pasif ada tespit yöntemleri düşük yüksek gerilim değişimi (UV/OV), alçak yüksek frekans (UF/OF), frekans değişim oranı (ROCOF) ve güç değişim oranı (ROCOP) 'dır. Bu yöntemler basit ve düşük maliyetli uygulama imkânına sahip olsa da en önemli dezavantajları geniş ADB'ye sahip olmalarıdır. Yeni bir çalışmada, ROCOF'a bağlı ada çalışma tespiti iletişime bağlı ölçüm üniteleri kullanılarak yapılmıştır [34]. Son yıllarda literatürde bu problemi ortadan kaldırmak ve ADB'yi en aza indirmek amacıyla yapay zekaya bağlı akıllı yöntemler ada çalışma tespitinde yoğun olarak kullanılmıştır. Birden fazla inverter kaynaklı DÜ'nün bulunduğu şebekede, DÜ'nün çıkışındaki gerilim ve frekanstaki değişim göz önüne alınarak gerilim değişiminin ortalama değeri olarak adlandırılan yeni bir parametre ile ada tespit algoritması oluşturulmuştur [35]. Gösterdiği sonuçlar açısından sıfır ADB ve hızlı tespit sağlasa da önerilen yöntemde dağıtık sistemin ya da yüklerin devreden çıkarılması söz konusudur ve bu önemli bir dezavantajdır. Küçük çaplı senkron generatörlerin bulunduğu çalışmada mikroşebeke modeli için önerilen yeni yöntemde senkron generatörün çıkışındaki eşdeğer direncin türevi ada tespit indeksi olarak kullanılmıştır [36]. Pasif yöntem için belirlenen eşik değer mikroşebeke yükünün gerilim ve frekansındaki sapmalara bağlı olarak adaptif şekilde elde edilmiştir. Önerilen yöntem, ada tespitini şebeke arızalarından, kararlı ve kararsız güç salınımlarından başarılı şekilde ayırabilmektedir. Ayrıca düşük ADB ve ada tespit süresi sağlamaktadır. Birden fazla senkron generatör için uygulanabilir olsa da inverter bazlı mikroşebeke için bir çalışma yapılmamıştır. Farklı bir çalışmada geleneksel ada yöntemlerinden farklı olarak DÜ kaynağının çıkışı yerine OBN'deki elektriksel parametreler ada çalışma tespiti için

kullanılmıştır [18]. Bu çalışmada OBN'deki harmonikler incelenmiş olup şebekeye paralel çalışmadan ada çalışmaya geçişte 5. Harmonikte önemli değişimler olduğu görülmüştür. Buradan hareketle 5. harmonik belirlenen eşik değerinden büyük olduğunda ada çalışma tespiti yapılmıştır ve statik anahtara açma sinyali verilmiştir. Önerilen yayın laboratuvar ortamında da test edilmiş olup, IEEE1547 standardının gereklerini sağlamıştır. Bu çalışma inverter kaynaklı tek dağıtık sistem için uygulanmış olup, birden fazla kaynak durumu incelenmemiştir. Harmonikleri dikkate alan bir diğer pasif ada tespit yöntemi OBN'deki veriler izlenerek inverter kaynaklı PV sistem için uygulanmıştır. Gerilim THD'sinin belirlenen eşik değerinin üzerinde olması durumunda akım toplam harmonik distorsiyonuna bakılarak ada tespiti yapılmıştır [37].

3.3.2 Sinyal İşlemeye Dayalı Metotlar (Signal Processing Based Schemes)

Sinyal işleme tekniklerine dayalı ada çalışma tespitinde elektriksel sinyaller farklı matematiksel modeller ile alt sinyallere ayrılır ve böylece ada çalışmaya bağlı özellikler ortaya çıkarılır. Ortaya çıkan bu alt sinyaller ile doğrudan ada çalışma tespiti yapılabilmektedir [38], [39]. Bunun yanı sıra bu alt sinyaller yapay zekaya bağlı algoritmalar için giriş verisi olarak kullanılıp ada ve ada olmayan durumlar çıktı verisi olarak sınıflandırılabilir. Sinyal işlemede kullanılan matematiksel modellere Fourier Dönüşümü, Dalgacık Dönüşüm, S Dönüşümü örnek gösterilebilir [40]. Bu yöntemler çeşitli ada çalışma tespit uygulamalarında kullanılmış olup yüksek doğruluk sağlamıştır. Bunun yanı sıra bazı çalışmalarda gürültülü ortamlar için doğruluğun düştüğü gözlemlenmiştir [39]. Sinyal işlemeye dayalı metotlar son yıllarda akıllı yöntemlere dayalı metotlar ile hibrit olarak önerilmiş olup bir sonraki bölümde örneklerine yer verilmiştir.

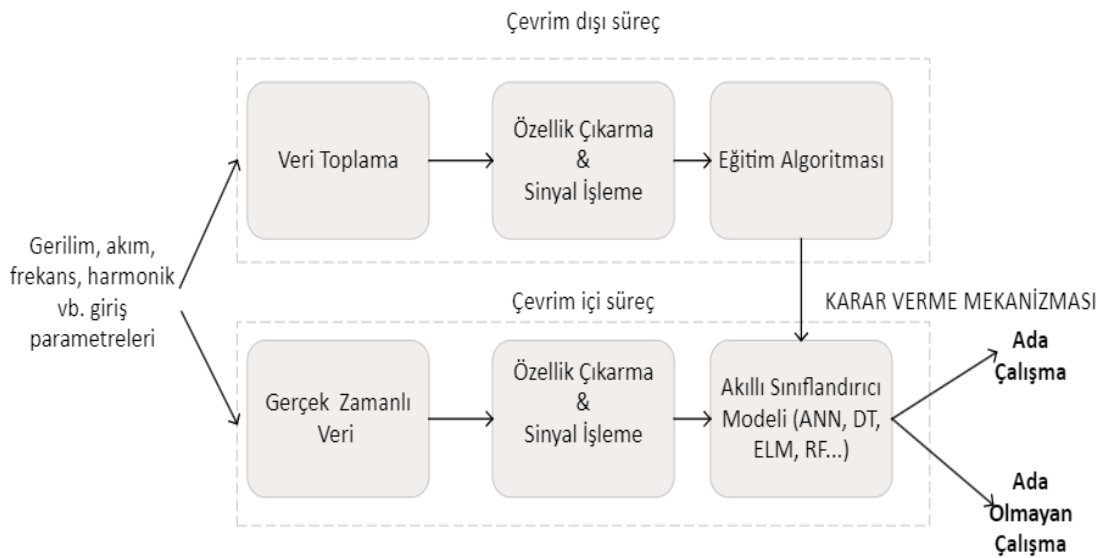


Şekil 6 Geleneksel pasif ada çalışma tespitine ait akış şeması (Schematic of conventional islanding detection methods)

3.3.3. Akıllı Yöntemlere Dayalı Metotlar (Computational Intelligent Methods)

Ada tespit çalışmasında akıllı yöntemlere dayalı metotlar, OBN’de veya DÜ’lerin çıkışında ölçülen elektriksel parametrelerin kaydedilmesiyle oluşturulan veri setine göre sınıflandırma yapmaktadır. Bu veri seti bazen gerçek hayattaki uygulamalardan alınarak elde edilse de güç sisteminde çok sayıda meydana gelen farklı olayın veri olarak kaydedilmesinin zorluğu nedeniyle sentetik olarak oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu veri setleri belirlenen akıllı yöntemler ile çevrimdışı olarak eğitilmekte ve test edilmektedir. En iyi performans sonucuna göre önerilen akıllı yöntemin hiper parametreleri tespit edilmektedir. Ada çalışma

tespitinde kullanılan akıllı yöntemlerin genel çalışma prensibi Şekil 7’de verilmiştir. Önerilen yöntem çalışmalarının bazılarında anlık elektriksel verilerin kaydedilmesi ile eğitim işlemi yapılırken, diğer çalışmalarda ise sinyal işlemeye bağlı yöntemler kullanılarak önce özellikler ortaya çıkarılmış daha sonra eğitim işlemi uygulanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan bazıları bu yöntemleri sadece simülasyon üzerinde test etmiştir. Diğer yandan bazı çalışmalarda önerilen akıllı metotlar çalışmanın doğruluğunu daha iyi ortaya koyması amacıyla gerçek zamanlı uygulamalar ile test edilmiştir. Bu çalışmalar da ayrı bir başlık altında Bölüm 3.4’te incelenmiştir.



Şekil 7. Akıllı Yöntemlere Dayalı Pasif Ada Çalışma Tespiti (Schematic of Intelligent Islanding Detection Methods)

Literatürde güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan akıllı yöntemlere karar ağacı, genetik algoritma, bulanık mantık, aşırı öğrenme makinesi, yapay sinir ağları, derin öğrenme algoritmaları (SAE, LSTM, CNN) örnek olarak verilebilir [33]. Ada çalışma tespitinde de kullanılan bu algoritmaların avantaj ve dezavantajları literatürdeki çalışmalarda konvensiyonel yöntemlerle karşılaştırılarak verilmiştir [37]. Laghari ve arkadaşları 3.3 kV seviyesinde çalışan iki adet hidro türbinin şebekeye paralel ve ada modunda çalışmasını dağıtım seviyesinde incelemiştir [41]. Önerilen modelde yapay sinir ağları kullanılmış ve ağı giriş parametreleri olarak frekans, gerilim, aktif ve reaktif güç değişimi seçilmiştir. Önerilen modelde 220 farklı senaryo ile eğitim veri seti oluşturulmuştur. Arıza durumları oluşturulan durumlarda hesaba katılsa da açma kapama durumları bu olasılıklarda dikkate alınmamıştır. Yapılan performans testlerinde ada çalışma tespiti için başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Merlin ve arkadaşları, yapay sinir ağları kullanarak senkron generatör kaynaklı DÜ'ler için yeni bir pasif ada tespit yöntemi sunmuştur [42]. Önerilen yöntem şebekeye bağlı tek bir senkron generatörün olduğu sistemde test edilmiş ve yapay sinir ağı için kullanılan veri, DÜ'nün çıkışındaki gerilim sinyalinden farklı işletme koşulları dikkate alınarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen yöntemin performansı aktif güç dengesizliğine bağlıdır, ayrıca ada tespit süresinin de aktif güç dengesizliği azaldıkça uzadığı görülmüştür. Önerilen yöntem güçlü bir performans sergilese de sadece tek kaynaklı dağıtık sistemin olması yöntemin esnekliğini engellemektedir. Bu çalışmanın devamı olarak önerilen yöntemin Labview platformu üzerinde gerçek zamanlı uygulaması yapılmıştır [43]. Gerçekleştirilen yapay sinir ağı algoritması tasarlanan dijital röle üzerine uygulanmıştır. Bu sayede röle üzerinde farklı topolojiler denenerek ada tespit yönteminin doğruluğu artırılmıştır. Simülasyon ve gerçek zamanlı uygulama arasında tespit süresi farkı yaklaşık olarak 0.02 s olmuştur ki bu da koruma mühendisliğinde ada çalışmaya karşı alınacak önlemlerde dikkate alınması gereken fazla zamanı ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmanın simülasyon sonuçları ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları birbirine yakındır ve pratikte uygulanabilirliğini göstermektedir. Çalışmalardan bazılarında yapay sinir ağı girişini oluşturmak için ayrık zamanlı dalgacık dönüşümü (DWT) kullanılmıştır [44],[45].

Dağıtık sistemin çıkışındaki frekans sinyalinin dalgacık dönüşümü ile ada çalışmanın çeşitli özellikleri ortaya çıkarılmış ve bu özellikler sinir ağı giriş için kullanılmıştır. Motor kalkışı, doğrusal olmayan yükler, kapasitör anahtarlama gibi farklı işletme koşulları dikkate alınmış ve test sonuçlarına göre yüksek doğrulukta performans sağlanmıştır. Bununla birlikte önerilen yöntem sadece inverter kaynaklı DÜ durumu için test edilmiştir [44]. Diğer yöntemde ise ada tespit yönteminde, diğer yayınlardan farklı olarak DWT ve ANN ile bir optimizasyon yöntemi birleştirilmiştir [45]. Diğer bir akıllı yöntemin kullanıldığı başka bir makalede, önerilen pasif ada tespit yöntemi yapay zeka algoritmalarından karar ağacı kullanılmış ve birden fazla DÜ'nün bağlı olduğu sistemde farklı çalışma koşulları dikkate alınarak geliştirilmiştir [46]. Önerilen yöntemde OBN'den alınan gerilim, akım, frekans, güç ve THD gibi 11 farklı ölçüm parametresi dikkate alınmış olup, veriler farklı şebeke topolojileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre düşük ADB elde edilirken ada durumunun tespit edilmesinde %16 gibi hata oranı ortaya çıkmıştır. Ayrıca çok fazla ölçüm indeksi kullanıldığından önerilen yöntemin uygulanabilirliği var olan röleler ve dağıtım sistemi ile hızlı cevapların alınabilmesi açısından mümkün görünmemektedir. Bazı çalışmalarda bulanık mantık tekniği sinir ağları ile birleştirilerek ada tespit yönteminde kullanılmıştır [47], [48]. Bu çalışmaların birinde OBN'deki gerilim, akım, frekans ve THD değerlerini dikkate alınırken, ikinci yayında DÜ'nün çıkışındaki THD değeri dikkate alınmıştır [47]. Çalışmanın ilkinde %78 gibi bir doğruluk elde edilirken, ikinci çalışmada %98'lere varan doğruluğa ulaşılmış fakat geniş bir ADB alanı meydana gelmiştir. Bu da ada tespitinin yapılamadığı alanı genişletmektedir. Ada çalışmayı tespit etmek için destek vektör makinesi (DVM) tek inverter kaynaklı DÜ'lerin olduğu sisteme uygulanmıştır. Önerilen yöntem geniş güç değişimlerinde başarısız olması sebebiyle aşırı/düşük gerilim ve frekans röleleri ile donatılmıştır [49]. Diğer çalışmada ada çalışmayı tespit etmek için ilk kez zaman serisi sinyalleri görüntüye dönüştürülerek DVM ile eğitilmiştir [50]. Sinyal işlemeye dayalı yöntemlerden Slantlet dönüşümü giriş özelliklerinin daha iyi şekilde ortaya çıkarılması için farklı türde makine öğrenmesi algoritmaları ile ada çalışma tespitinde kullanılmıştır [51]. Literatürde yaygın olarak tercih

edilen bir diğer makine öğrenmesi yöntemi aşırı öğrenme makineleri (AÖM) ada çalışmayı diğer şebeke olaylarından ayırt etmek için kullanılmıştır [52], [53], [54], [55]. Aşırı öğrenme makinesinin önerildiği çalışmada farklı tip DÜ'lerin olduğu IEEE 13 baralı dağıtım sistemi kullanılmıştır [52]. Önerilen yöntemde olması muhtemel bütün ada durumları için simülasyon çalışması yapılmış olup, OBN'deki akım ve gerilim sinyalleri dikkate alınarak güç değişimi, frekans değişimi gibi 45 farklı özellik kullanılarak oluşturulan 1864 adet veri ile eğitim gerçekleştirilmiş ve ada durumu sınıflandırılmıştır. Çok sayıda özellik hesaplanarak gerçekleştirilen bu çalışmayı gürültü ve kompleks işlemler zorlaştırmaktadır, bu nedenle farklı metodlardan yararlanılarak en etkili özellikler optimizasyon yöntemiyle ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlarda 75ms ortalama tespit süresi ve %95 civarında doğruluk sağlanmıştır. Diğer çalışmada AÖM ile yüzde yüze yakın doğruluk elde edilse de önerilen yöntemin performansı gürültülü ortamda düşmüştür. Bu çalışma 500 farklı örnek durum ile test edilmiştir [53]. Düşük sayıda kullanılan veri setleri öğrenmenin ezberlenmesine sebep olmaktadır. Yeni örneklerin test edilmesinde ise test doğruluğu önemli oranda düşmektedir. Düşük veri setinin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise ayrık dalgacık dönüşümü ile giriş sinyalindeki bozukluklar ortaya çıkarılmış ve yapay sinir ağları ile eğitim gerçekleştirilmiştir [56]. [51] numaralı yayında faz uzayı tekniği ve AÖM kullanılarak ada tespit yöntemi geliştirilmiştir. İleri yönlü sinir ağı yapısının kullanıldığı bu öğrenmede, birden fazla AÖM birleştirilerek gruplar şeklinde halinde sınıflandırma yapılmıştır. Diğer makine öğrenmesi yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek doğrulukla ve daha hızlı bir ada tespiti gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritma farklı tipte DÜ kaynaklarının olduğu şebeke sistemi için ada çalışma tespitinde kullanılmış ve önerilen yöntem sentetik olarak oluşturulan yaklaşık 2500'e yakın veri seti ile test edilmiştir [57]. Yapay sinir ağlarında kullanılan çok katmanlı algılayıcılar dalgacık dönüşümü ile birleştirilerek inverter kaynaklı DÜ sistemi için ada çalışmanın tespitinde kullanılmıştır [58]. Khamis ve arkadaşlarının önerdiği yayınlarda akıllı yonteme dayalı iki farklı ada çalışma tespit metodu önerilmiştir [59], [60]. Çalışmalarda yapay ve olasılıksal sinir ağları sınıflandırıcı olarak kullanılırken faz uzay ve dalgacık dönüşümleri giriş parametrelerinin özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin performansı

yaklaşık 4000-veri seti ile analiz edilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü ile faz uzayı tekniğinden faydalanılan çalışmada sinir ağı için farklı girdiler oluşturulmuştur ve bu metodlar karşılaştırılmıştır [59]. Bu teknik gerilim sinyalinin ada çalışma durumu dışında kalan bütün özelliklerini ortaya çıkarmada kullanılmıştır. Sinir ağında 3166 örnek durumun %80'i eğitim aşamasında kullanılırken geri kalanı ise test ve doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre faz uzayı tekniği ile oluşturulan sinir ağı, dalgacık dönüşümle oluşturulan ağa göre yüksek doğrulukta bir performans sergilemiştir.

Son yıllarda derin öğrenmeye bağlı algoritmalar da ada çalışma tespitinde kullanılmıştır. Derin öğrenme yöntemi, yapay sinir ağlarına bağlı bir makine öğrenmesi olup, lineer olmayan ve aralarında karmaşık ilişkiler bulunan problemlerde özellikle çok sayıda verinin olduğu işlemlerde farklı eğitim algoritmaları ile uygulanmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları geleneksel sinir ağlarından farklı olarak kompleks veri setlerini birden fazla katman kullanarak ham veriden gerekli bilgilerin ortaya çıkarılmasına olanak sağlamaktadır [61]. Yaygın olarak kullanılan derin öğrenme mimarilerine evrimsel sinir ağı, yığılmış oto kodlayıcılar (SAE), sınırlı Boltzmann makinesi (RBM), tekrarlayan sinir ağı (RNN) örnek olarak verilebilir. Literatürde SAE'nin kullanıldığı ada çalışma tespit yönteminde yüksek doğruluk elde edilmesine rağmen, önerilen yöntemde ada olmayan çalışma durumları için kapasitör anahtarlama, arızalar, doğrusal olmayan yüklerin anahtarlama gibi sıklıkla karşılaşılan şebeke olayları dikkate alınmamıştır [62]. Önerilen yöntem karar ağacı ve destek vektör makinesi ile karşılaştırıldığında daha yüksek tespit süresine ve doğruluğa ulaşılmıştır. Çok katmanlı ileri yönlü yapay sinir ağının kullanıldığı yöntemde girdiler dalgacık dönüşümü kullanılarak OBN'deki gerilim sinyallerinin alt birimlere dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. Önerilen yöntem inverter kaynaklı güneş üretim kaynağının bağlı olduğu dağıtık sistem için oluşturulmuştur [62]. Benzer bir yayında DÜ'lerin çıkışında ölçülen akımın simetrik bileşenleri dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılmış ve çok katmanlı derin sinir ağı ile eğitilmiştir [63]. Diğer bir derin öğrenme algoritması olan uzun kısa dönemli hafıza (LSTM) ağları da DÜ'lerin çıkışlarındaki sinyallerin ayrık dalgacık dönüşümü ile analiz edilmesiyle ada çalışma tespitinde kullanılmıştır [64], [65]. Bukhari ve arkadaşlarının önerdiği

çalışmada önerilen yöntemin etkinliği IEC mikro şebekesi ve IEEE 34 baralı sistemi üzerinde ayrı ayrı test edilerek doğruluk, gürültü, ADB ve tespit süresi dikkate alınarak analiz edilmiştir. LSTM yönteminde katman sayısı arttırıldıkça doğruluğun arttığı gözlemlenmiştir fakat test verisinde ezberleme problemi nedeniyle doğruluk performansı kötüleşmiştir. LSTM yönteminin kullanıldığı başka bir yayında ise OBN'den anlık olarak ölçümü alınan parametreler herhangi bir dönüşüm aracı kullanılmadan eğitilmiş ve farklı tipte DÜ'lerin olduğu mikro şebeke üzerinde test edilmiştir. Diğer yayınlardan farklı olarak şebekeye ilave DÜ kaynakları eklenmesi durumunda da test

edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [66]. Aynı yazarın diğer bir yayınında diğer bir derin öğrenme algoritması olan CNN yöntemi ada çalışma tespitinde kullanılmış ve LSTM yöntemi ile birleştirilerek derin öğrenme yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır [67]. Akıllı yöntemler çalışmaların bazılarında sinyal işlemeye dayalı tekniklerle birleştirilerek hibrit yöntemler olarak sunulmuştur [68]. Literatürdeki çalışmalardan bazılarının özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bazı akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metotlarının karşılaştırılması (Comparison of different intelligent islanding detection methods)

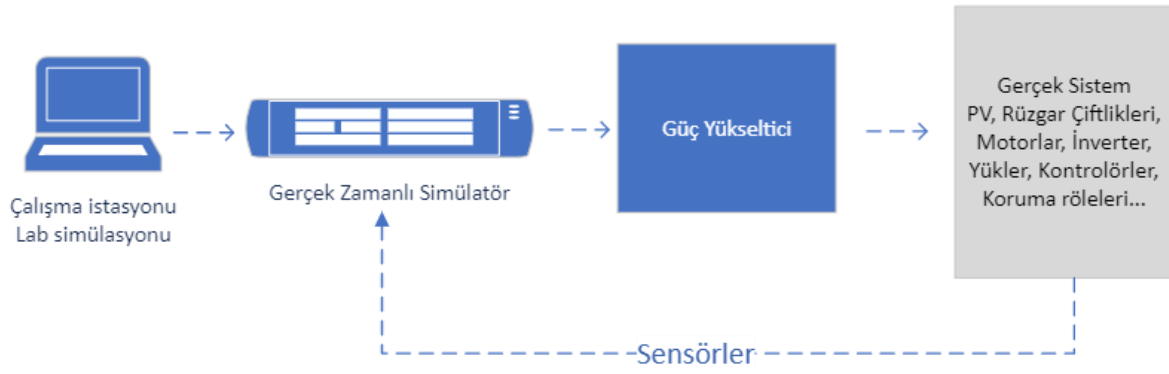
Ref.	Metot	Bağlantı	Topoloji	Hız	ADB	Karşılaştırılan Yöntemler
[53]	AÖM with S-Transform	DÜ	SDÜ and İDÜ	78.5 ms	x	ANN, SVM
[58]	Multi-ANN with WT	OBN	İDÜ	~50 ms	%6	x
[62]	SAE	OBN	İDÜ	180 ms	x	DT, SVM
[64]	LSTM STFT	DÜ	SDÜ and İDÜ	2-10 ms	x	DT, SVM, ANN
[66]	Multi-LSTM	OBN	SDÜ and İDÜ	~50 ms	Yaklaşık sıfır	SVM, DT, ANN
[67]	CNN-LSTM	OBN	SDÜ and İDÜ	~50 ms	Yaklaşık sıfır	LSTM
[69]	ANFIS	OBN	İDÜ	~40 ms	$I_{ndz}=\%49$	ANN, ANFIS
[70]	SVM	OBN	İDÜ s	~40 ms	$I_{ndz}=\%9.5$	ANN, ANFIS
[71]	Feedback mechanism	OBN	İDÜ	~700 ms	x	x
[72]	Adaboost	OBN	SGs	~219 ms	$+0.5\% \leq \Delta P \leq +8$	SVM, Bayes
[73]	Adaboost	OBN	İDÜs	x	x	UOV/UOF, Adaboo
[74]	GWO-ANN	DÜ	SDÜ and İDÜ	~100 ms	x	SVM, AÖM
[75]	ANN	OBN	İDÜ	40 ms	%11,3	SVM, ANFIS
[76]	Adaptif sinyal tahmini	OBN	SDÜ and İDÜ	220 ms	$\Delta Q = \pm 1.2\%$	Prony, ESPIRIT

SDÜ: Senkron kaynaklı DÜ, OBN: Ortak bağlantı noktası, İDÜ: İnverter kaynaklı DÜ

4. ADA ÇALIŞMA TESPİT METOTLARININ LABORATUVAR ORTAMINDA TEST EDİLMESİ (REAL-TIME SIMULATION OF ISLANDING DETECTION METHODS)

Gerçek zamanlı döngüde donanımsal benzetim (HIL), tasarlanan kontrol algoritmalarının gerçek donanımlar olmadan, zaman ve maliyet kaybının azaltılarak test etme imkânı sağlayan tekniklerin genel ismidir. Son yıllarda araştırma ve endüstride otomotiv, havacılık, robotik, elektrik gibi alanlarda

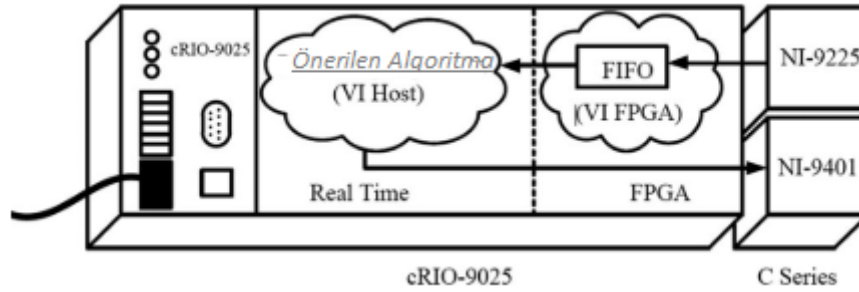
yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen karmaşık gömülü sistem tasarımlarının sahadaki testinden önce gerçek zamanlı olarak bilgisayarlar üzerinde test edilmesine ve gerekli kontrollerin gerçekleştirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sayede zaman, maliyet ve riskler büyük oranda düşürülmektedir [77]. Örnek bir gerçek zamanlı güç donanımsal benzetimin çalışması Şekil'8 de verilmiştir.



Şekil 8. Ada çalışma tespiti için örnek gerçek zamanlı HIL sisteminin şeması [40] (Schematic of real time hardware in the loop for islanding detection)

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu ada çalışma tespiti için önerilen yöntemi simülasyon üzerinde test etmişlerdir. Diğer yandan bazı çalışmalarda ada çalışmanın tespiti simülasyon çalışmasının yanı sıra gerçek zamanlı simülatörler ile laboratuvar ortamında test edilmiştir ve önerilen yöntemlerin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Akıllı rölenin karar ağacı yöntemiyle eğitilmesine bağlı oluşturulan bir ada çalışma tespit metodunda önerilen yöntemin simülasyon çalışmasında %99.7 olarak hesaplanan güvenilirlik indeksi, gerçek zamanlı donanımsal simülasyon çevriminde %96.6

olarak hesaplanmıştır [78]. Yapay sinir ağlarına dayalı önerilen ada çalışma tespit yönteminde laboratuvar ortamında ada çalışmayı tespit etme süresi simülasyon sırasındaki tespit süresinden yaklaşık 5 ile 40 ms daha düşük hesaplanmıştır [43]. Gerçek zamanlı donanım aracı olarak cRIO-9025 FPGA (Alanda programlanabilir kapı dizisi), gerilim sinyallerini elde etmek için gerekli analog dijital dönüştürücü NI-9225 ve yapay zeka algoritması tarafından üretilen sinyali çıkışa aktaran NI-9401 modülleri kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait ada çalışma test modeli Şekil 9’da verilmiştir.



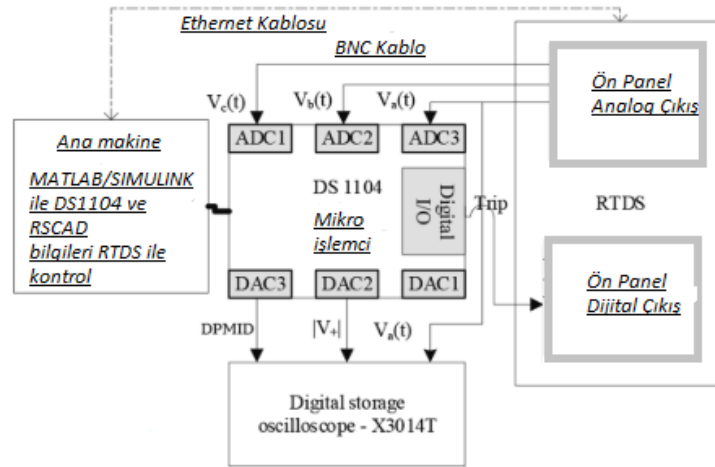
Şekil 9. FPGA ile gerçekleştirilen ada çalışma tespitinin blok şeması [43] (Block diagrams of the islanding detection method with FPGA)

Diğer bir uygulama çalışmasında OBN’deki beşinci harmonik değeri dikkate alınarak önerilen bir ada çalışma tespit metodu SEL 735 dijital rölesi kullanılarak mikroşebeke laboratuvarında test edilmiştir. Önerilen algoritma ile gerçekleştirilen testlerin sonucuna göre ada çalışmayı ortalama 300 ms’de tespit etmiştir [18]. Bununla birlikte simülasyon ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları değerlendirildiğinde önerilen dijital rölenin pratik olarak uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Mikro şebekeler için önerilen bir diğer ada çalışma tespit metodu, gerilimin önceden belirlenen eşik değeri aşması durumunda maksimum güç noktasını takip

eden (MPPT) algoritmayı tetikleyecek şekilde tasarlanmış ve dijital röleler ile donatılan gerçek zamanlı HIL çalışması ile doğrulanmıştır [79]. Ada çalışma IEEE 1547 ve UL1471 standartlarında tanımlanan çeşitli senaryolar ile yaklaşık 300 ms’de tespit edilmiş ve neredeyse sıfıra yakın ADB performansı elde edilmiştir. Ada çalışma tespitinin deneysel olarak gerçekleştirildiği bir diğer önemli çalışma ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı (NREL) tarafından gerçekleştirilmiş olup, şebekeye bağlı birden fazla PV inverterin olduğu sistemde ada çalışmanın etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir [80],[81]. İlk kez birden fazla inverterin olduğu

dağıtık şebeke sistemi gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen 244 testin tamamında ada çalışma yaklaşık 700 ms ile tespit edilerek IEEE 1547 standardında belirtilen maksimum 2 saniye koşulunu rahatlıkla sağlamıştır. Yılmaz ve arkadaşlarının dalgacık dönüşüm kullanarak önerdiği ada çalışma tespit yöntemi PV bağlı inverter sistemi üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmiştir [80]. Önerilen yöntemin karşılaştırılan diğer yöntemlere göre ada çalışmayı daha hızlı tespit ettiği deneysel olarak doğrulanmıştır. Yazarın diğer bir çalışmasında sinyal işlemeye dayalı bir diğer ada çalışma tespit yöntemi yakıt hücresi içeren bir mikro şebeke üzerinde uygulanmıştır [38]. Yazarların diğer bir çalışmasında sinyal işlemeye dayalı ada çalışma tespit yöntemi yakıt hücresi içeren bir mikro şebeke üzerinde uygulanmıştır [82]. Ayrık dalgacık dönüşümün kullanıldığı diğer çalışmada ise sinyal işleme dayalı yöntem MATLAB/Simulink aracılığı ile Xilinx sistem generatörü kullanılarak doğrulanmıştır [83]. Önerilen yöntemin etkinliği sıfır güç değişimi, gürültülü ortam, arıza durumları, kapasitör ve asenkron motor anahtarlama gibi farklı ada ve ada olmayan çalışma koşulları için test edilmiştir. Önerilen yöntem ada çalışmayı 75 ms ile tespit etmekte ve sıfır ADB durumunda da tespit yapabilmektedir. Chaitanya ve arkadaşlarının önerdiği ada çalışma tespit yönteminde makine öğrenmesi yöntemlerinden en yakın komşu algoritması sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu hem simülasyon üzerinde farklı bir şebeke sistemi üzerinde araştırılmış hem de HIL test sistemi OPAL-RT

simülatörleri ile kurularak test edilmiştir [84]. Karar ağacı öğrenme metodunun önerildiği bir başka çalışmada ADB'yi düşürmek için HIL sistemine dayalı bir ada çalışma tespiti yapılmıştır. Çalışma sonuçlarında gerçek zamanlı simülasyon ve özellik tanıma algoritmasının birleşimi ile başarılı bir donanım uygulaması gerçekleştirilmiştir [85]. Gerçek zamanlı dijital simülatör ile doğrulan bir başka çalışmada RTDS (Gerçek zamanlı dijital simülatör) ve DSP/FPGA donanımları ile PV kaynakların ve dönüştürücülerin kontrolü sağlanmıştır [73]. Birden fazla güneş panelinin olduğu dağıtık sistem için Adaboost algoritması önerilmiştir. DÜ sisteminin çıkışındaki gerilim bileşenlerinin kullanıldığı ada çalışma tespit yönteminde gerçek zamanlı simülatör üzerinde oluşturulan mikro şebekede ada ve ada olmayan durumlar simule edilmiştir. FPGA üzerinde programlanan kontrol algoritmasına göre ada çalışma durumu için kesiciye açma sinyali gönderilmiştir. Ayrıca Verilog HDL dili ile programlanan donanım sayesinde hesaplama maliyeti düşürülmüştür [86]. Fazör ölçüm cihazları ile dağıtım generatörlerinin bağlı olduğu baralarda gerilim fazörü ölçülerek ada çalışma tespiti yapılmıştır. Önerilen yöntem çevrimiçi alınan sinyalleri kullanarak Teager-Kaiser isimli geliştirilen yöntemle ada çalışmayı başarılı şekilde diğer bozukluklardan ayırt etmiştir [79]. Modelin HIL testi Matlab/Simulink RTDS ile gerçekleştirilmiş, ada çalışmayı tespit cihazı olarak ise DS1104 mikroişlemci kullanılmıştır. Önerilen çalışmanın gerçek zamanlı blok diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 10. RTDS ile gerçekleştirilen için ada çalışma tespit simülatörü [79] (Block diagrams of real time digital simulator for the islanding detection method)

Çoklu dağıtık üretimin bağlı olduğu sistem için geliştirilen yöntemde önerilen algoritma Raspberry PI ile uygulanmıştır. Ve OP-4510 gerçek zamanlı simülatörler ile MATLAB/Simulink kullanılarak test edilmiştir. [87]. Görünür gücün pozitif bileşenindeki değişimi dikkate alan bir diğer ada çalışma tespit yönteminde de sonuçlar OPAL-RT simülatör kullanılarak doğrulanmıştır [88]. Önerilen yöntemin simülasyon ve deneysel sonuçları arasındaki benzerlik önerilen yöntemin gerçek zamanlı olarak uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Yazarların diğer bir çalışmasında ise dağıtık üretimlerin çıkışlarındaki ve şebeke tarafındaki gerilim ve akım sinyalinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesine dayalı bir ada çalışma tespiti önerilmiştir [89]. Geleneksel yöntemlere dayalı önerilen sistemde önceden belirlenen bir eşik değere göre ada çalışma tespit edilmektedir. Benzer şekilde bu çalışma da deneysel olarak OPAL-RT simülatörler ile doğrulanmıştır. Aktif ada çalışma tespit yönteminin önerildiği çalışmada Typhoon HIL 604 platformu üzerinde modelin performansı

test edilmiştir [90]. 840 kW'lık bir inverter ve PV kontrol ünitesi ile test edilen sistemde herhangi bir istenmeyen ada çalışma durumu 500 milisaniyenin altında tespit edilmiş ve inverterin çalışması durdurulmuştur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında altı milisaniyelik bir fark olduğu ortaya konmuştur.

Akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metodları üzerinde son yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Özellikle gerçek zamanlı olarak deneysel uygulaması gerçekleştirilen yöntemlerde, akıllı yöntemlere dayalı metodların deneysel olarak da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte simülasyon sonuçlarındaki ada çalışma tespit süresi ile gerçek zamanlı deneysel uygulamalardaki ada çalışma tespit süresi arasında farklılıklar oluşmaktadır. Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ada çalışma tespit yöntemlerinde hibrit tekniklerin kullanımı işlem karmaşıklığına neden olurken performansın artmasına önemli katkı sağlamıştır.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

İn Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonunda karşılaşılan en önemli problemlerden biri ada çalışmanın tespit edilmesidir. Güç sisteminin kesintisiz sürdürülebilir ve efektif bir şekilde işletilerek, belirlenen kontrol yöntemlerinin zamanında devreye girebilmesi için ada çalışmayı hızlı şekilde tespit edebilen, maliyeti düşük, ADB'nin minimum olduğu efektif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ada çalışma durumunu tespit etmek için ortaya konulan yöntemler incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bir ada çalışma tespit metodunun etkinliği, yanlış açma yüzdesi, maliyeti, uygulama pratikliği, matematiksel işlem yoğunluğu, ADB durumu, mikro şebekeye uygulanma kapasitesi, güç kalitesine etkisi önemli değerlendirme kriterleri olmuştur. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında konvensiyonel metodların yerini, uygulaması basit, hızı yüksek, maliyeti düşük pasif ada çalışma metodlarının aldığı görülmektedir. Özellikle makine öğrenmesine dayalı metodlar sinyal işleme dayalı teknikler ile kullanılarak ada çalışmanın tespiti için önerilmiştir. Ölçümü yapılan elektriksel parametreler sinyal işleme teknikleri kullanılarak özelliklerin daha iyi şekilde ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Öte yandan sinyal işleme tekniklerinin kullanıldığı bazı

durumlarda gürültülü ortamlarda performansın düştüğü tespit edilmiştir. Makine öğrenmesine dayalı yöntemler ile başarılı sonuçlar elde edilmesine karşın kullanılan veri setinin özelliği, senaryoların türü ve sayısı uygulanan yöntemin performansını doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra akıllı yöntemlere dayalı metodlar geleneksel yöntemlerdeki eşik değer belirleme problemini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca çok sayıda DÜ'nün olduğu karmaşık güç sistemleri için bile akıllı yöntemler ile gerçekleştirilen ada tespit çalışmaları 5 ms ile 500 ms arasında değişen hızda tespit yapabilmektedir. Diğer bir avantaj ise akıllı yöntemlerin geleneksel ada çalışma tespit yöntemlerinin diğer bir problemi olan ADB'yi ciddi oranda azaltması veya ortadan kaldırmasıdır. Geleceğe yönelik çalışmalar için akıllı yöntemlere dayalı geniş veri ihtiyacının ortadan kaldırılması, yanlış açma oranlarının düşürülmesi, sinyal işleme dayalı yöntemlerde gürültü probleminin olumsuz etkisinin giderilmesi gibi konulara alternatif çözümler getirilmelidir.

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)

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

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (References)

- [1] International Energy Agency, "A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas," 2022. [Online]. Available: www.iea.org
- [2] [R. Lasseter et al., "The CERTS microgrid concept, white paper on integration of distributed energy resources," California Energy Commission, Office of Power Technologies-US Department of Energy, LBNL-50829, <http://certs.lbl.gov>, p. 29, 2002.
- [3] M. R. Tur and F. Yaprakdal, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, vol. 8, no. 3, pp. 572–587, 2020, doi: 10.29109/gujsc.722014.
- [4] J. M. Lee, "Islanding Detection Methods for Microgrids," p. 125, 2011.
- [5] D. Kumar and P. S. Bhowmik, "Artificial neural network and phasor data-based islanding detection in smart grid," IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 12, no. 21, pp. 5843–5850, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6299.
- [6] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar, and H. Mohamad, "Computational Intelligence based techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review," Energy Conversion and Management, vol. 88, pp.

- 139–152, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.024.
- [7] "IEEE Std 1547-2018-IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," 2018.
- [8] A. Yılmaz and G. Bayrak, "Mikro Şebekelerde Ada Mod Çalışmanın Geliştirilen Sürekli Dalgacık Dönüşümü Yöntemi ile Gerçek Zamanlı Olarak Tespiti," no. December, 2019.
- [9] R. M. Radhakrishnan, A. Sankar, and S. Rajan, "A combined islanding detection algorithm for grid connected multiple microgrids for enhanced microgrid utilisation," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 2, pp. 1–22, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12232.
- [10] K. H. Reddy, "Variable converter Pulse Island test in integrated distributed generation of electrical energy system: Variable converter pulse based island detection," International Transactions on Electrical Energy Systems, no. January, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12920.
- [11] R. Zamani, M. E. Hamedani Golshan, H. Haes Alhelou, and N. Hatziargyriou, "A novel hybrid islanding detection method using dynamic characteristics of synchronous generator and signal processing technique," Electric Power Systems Research, vol. 175, no. May, p. 105911, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105911.
- [12] D. P. Mishra, S. R. Samantaray, and G. Joos, "A combined wavelet and data-mining based intelligent protection scheme for microgrid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 5, pp. 2295–2304, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2487501.
- [13] A. Etxegarai, P. Eguía, and I. Zamora, "Analysis of remote islanding detection methods for distributed resources," Renewable Energy and Power Quality Journal, vol. 1, no. 9, pp. 1142–1147, 2011, doi: 10.24084/repqj09.580.
- [14] G. Bayrak and E. Kabalci, "Implementation of a new remote islanding detection method for wind-solar hybrid power plants," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1–15, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.227.
- [15] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-

- islanding schemes based on nondetection zone concept,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1171–1176, 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.833436.
- [16] J. C. M. Vieira, D. Salles, and W. Freitas, “Power imbalance application region method for distributed synchronous generator anti-islanding protection design and evaluation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 10, pp. 1952–1960, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.06.009.
- [17] W. Freitas, W. Xu, C. M. Affonso, and Z. Huang, “Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 II, pp. 1315–1324, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.834869.
- [18] J. Merino, P. Mendoza-Araya, G. Venkataramanan, and M. Baysal, “Islanding Detection in Microgrids Using Harmonic Signatures,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2102–2109, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2383412.
- [19] R. Haider, C. H. Kim, T. Ghanbari, S. Basit, and A. Bukhari, “Harmonic signature based islanding detection in grid-connected distributed generation systems using Kalman filter,” pp. 1813–1822, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5381.
- [20] S. Park, M. Kwon, and S. Choi, “Reactive Power P&O Anti-Islanding Method for a Grid-Connected Inverter with Critical Load,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 204–212, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2818441.
- [21] X. Chen, Y. Li, and P. Crossley, “A novel hybrid islanding detection method for grid-connected microgrids with multiple inverter-based distributed generators based on adaptive reactive power disturbance and passive criteria,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 9342–9356, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2886930.
- [22] H. Vahedi, M. Karrari, and G. B. Gharehpetian, “Accurate SFS Parameter Design Criterion for Inverter-Based Distributed Generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1050–1059, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2391193.
- [23] N. Ikken, N. Tariba, A. Bouknadel, A. Haddou, H. El Omari, and H. El Omari, “A fuzzy rule based approach for islanding detection in grid connected inverter systems,” vol. 11, no. 6, pp. 4759–4766, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i6.pp4759-4766.
- [24] M. S. Kim, R. Haider, G. J. Cho, C. H. Kim, C. Y. Won, and J. S. Chai, “Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems,” *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 1–21, 2019, doi: 10.3390/en12050837.
- [25] S. Perlenfein, M. Ropp, J. Neely, S. Gonzalez, and L. Rashkin, “Subharmonic power line carrier (PLC) based island detection,” *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2015-May, no. May, pp. 2230–2236, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104659.
- [26] C. Li, C. Cao, Y. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, and B. Fang, “A review of islanding detection methods for microgrid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 211–220, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.026.
- [27] S. Chandak, P. Bhowmik, M. Mishra, and P. K. Rout, “Autonomous microgrid operation subsequent to an anti-islanding scheme,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, no. December 2017, pp. 430–448, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.03.009.
- [28] A. M. Massoud, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, “Harmonic distortion-based island detection technique for inverter-based distributed generation,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 493–507, 2009, doi: 10.1049/iet-rpg.2008.0101.
- [29] R. H. Lasseter, “Microgrids and distributed generation,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 225–234, 2010, doi: 10.1080/10798587.2010.10643078.
- [30] A. Hussain, C. H. Kim, and A. Mehdi, “A Comprehensive Review of Intelligent Islanding Schemes and Feature Selection Techniques for Distributed Generation System,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 146603–146624, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123382.
- [31] Y. Bicer, I. Dincer, and M. Aydin, “Maximizing performance of fuel cell using artificial neural network approach for smart grid applications,” *Energy*, vol. 116, pp.

- 1205–1217, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.050.
- [32] F. Yaprakdal and M. Baysal, “Optimal Operational Scheduling of Reconfigurable Microgrids in Presence of Renewable Energy Sources,” *Energies*, no. May, 2019, doi: 10.3390/en12101858.
- [33] B. K. Panigrahi, A. Bhuyan, J. Shukla, P. K. Ray, and S. Pati, “A comprehensive review on intelligent islanding detection techniques for renewable energy integrated power system,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 10, pp. 14085–14116, 2021, doi: 10.1002/er.6641.
- [34] M. W. Altaf, M. T. Arif, S. Saha, S. N. Islam, M. E. Haque, and A. M. T. Oo, “Effective ROCOF Based Islanding Detection Technique for Different Types of Microgrid,” *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 2021-Octob, no. 2, pp. 1809–1821, 2021, doi: 10.1109/IAS48185.2021.9677270.
- [35] A. G. Abd-Elkader, S. M. Saleh, and M. B. Magdi Eiteba, “A passive islanding detection strategy for multi-distributed generations,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, no. November 2017, pp. 146–155, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.005.
- [36] R. Bekhradian, M. Davarpanah, and M. Sanaye-Pasand, “Novel Approach for Secure Islanding Detection in Synchronous Generator Based Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8977, no. c, pp. 1–1, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2869300.
- [37] R. Somalwar, S. G. Kadwane, and D. K. Mohanta, “Harmonics-Based Enhanced Passive Islanding Method for Grid-Connected System,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 14, pp. 1554–1563, 2017, doi: 10.1080/15325008.2017.1361485.
- [38] A. Yılmaz and G. Bayrak, “An Improved Cwt-Based Islanding Detection Method for a Developed Microgrid in Real-Time,” *Mugla Journal of Science and Technology*, no. June, 2020, doi: 10.22531/muglajsci.654432.
- [39] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, “Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 3, pp. 805–819, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2010.11.011.
- [40] S. Raza, H. Mokhlis, H. Arof, J. A. Laghari, and L. Wang, “Application of signal processing techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 96, pp. 613–624, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.029.
- [41] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar, and A. Shahriari, “Artificial neural network based islanding detection technique for mini hydro type distributed generation,” *IET Seminar Digest*, vol. 2014, no. CP659, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.1469.
- [42] V. L. Merlin, R. C. Santos, A. P. Grilo, J. C. M. Vieira, D. V. Coury, and M. Oleskovicz, “A new artificial neural network based method for islanding detection of distributed generators,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 75, pp. 139–151, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.016.
- [43] N. B. Hartmann, R. C. Dos Santos, A. P. Grilo, and J. C. M. Vieira, “Hardware Implementation and Real-Time Evaluation of an ANN-Based Algorithm for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 6, pp. 5051–5059, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2767524.
- [44] F. Hashemi and M. Mohammadi, “Islanding detection approach with negligible non-detection zone based on feature extraction discrete wavelet transform and artificial neural network,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016.
- [45] M. Tarafdar Hagh, H. Ebrahimian, and N. Ghadimi, “Hybrid intelligent water drop bundled wavelet neural network to solve the islanding detection by inverter-based DG,” *Frontiers in Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 75–90, 2015, doi: 10.1007/s11708-014-0337-3.
- [46] K. El-Arroudi, G. Joos, I. Kamwa, and D. T. McGillis, “Intelligent-based approach to islanding detection in distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 828–835, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.893592.
- [47] D. Mlakic, H. R. Baghaee, and S. Nikolovski, “A Novel ANFIS-based

- Islanding Detection for Inverter-Interfaced Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2859360.
- [48] R. K. Patnaik and P. K. Dash, “Impact of wind farms on disturbance detection and classification in distributed generation using modified Adaline network and an adaptive neuro-fuzzy information system,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 30, pp. 549–566, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.009.
- [49] B. Matic-cuka and M. Kezunovic, “Islanding Detection for Inverter-Based Distributed Generation Using Support Vector Machine Method,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2676–2686, 2014.
- [50] S. K. G. Manikonda and D. N. Gaonkar, “Islanding detection method based on image classification technique using histogram of oriented gradient features,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 14, pp. 2790–2799, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1824.
- [51] M. Ahmadipour, H. Hizam, M. Lutfi Othman, M. A. M. Radzi, and N. Chireh, “A novel islanding detection technique using modified Slantlet transform in multi-distributed generation,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 112, no. April, pp. 460–475, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.008.
- [52] S. Chandak, M. Mishra, S. Nayak, and P. K. Rout, “Optimal feature selection for islanding detection in distributed generation,” *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 85–95, 2018, doi: 10.1049/iet-stg.2018.0021.
- [53] M. Mishra and P. K. Rout, “Fast discrete s-transform and extreme learning machine based approach to islanding detection in grid-connected distributed generation,” *Energy Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 757–789, 2019, doi: 10.1007/s12667-018-0285-9.
- [54] A. Khamis, Y. Xu, Z. Y. Dong, and R. Zhang, “Faster Detection of Microgrid Islanding Events Using an Adaptive Ensemble Classifier,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1889–1899, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2601656.
- [55] T. S. Menezes, R. A. S. Fernandes, and D. V. Coury, “Intelligent islanding detection with grid topology adaptation and minimum non-detection zone,” *Electric Power Systems Research*, vol. 187, no. February, p. 106470, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106470.
- [56] M. Heidari, G. Seifossadat, and M. Razaz, “An intelligence-based islanding detection method using DWT and ANN,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 23, no. 2, pp. 381–394, 2015, doi: 10.3906/elk-1210-107.
- [57] E. C. Pedrino, T. Yamada, T. R. Lunardi, and J. C. de M. Vieira, “Islanding detection of distributed generation by using multi-gene genetic programming based classifier,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 74, pp. 206–215, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2018.10.016.
- [58] E. Shahryari, M. Nooshyar, and B. Sobhani, “Combination of neural network and wavelet transform for islanding detection of distributed generation in a small-scale network,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 263–273, 2019, doi: 10.1080/01430750.2017.1392348.
- [59] A. Khamis, H. Shareef, A. Mohamed, and E. Bizkevelci, “Islanding detection in a distributed generation integrated power system using phase space technique and probabilistic neural network,” *Neurocomputing*, vol. 148, pp. 587–599, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2014.07.004.
- [60] A. Khamis, H. Shareef, and A. Mohamed, “Islanding detection and load shedding scheme for radial distribution systems integrated with dispersed generations,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2261–2275, 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0263.
- [61] Y. Bengio, “Learning Deep Architectures for AI,” *Foundations and Trends_R in Machine Learning*, vol. 2, no. 1, 2009, doi: 10.1561/2200000006.
- [62] X. Kong, X. Xu, Z. Yan, S. Chen, H. Yang, and D. Han, “Deep learning hybrid method for islanding detection in distributed generation,” *Applied Energy*, vol. 210, no. April 2017, pp. 776–785, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.014.
- [63] A. Najjar, H. K. Karegar, and S. Esmailbeigi, “Intelligent Islanding Detection Scheme for Microgrid Based on Deep Learning and Wavelet Transform,”

- 2020 10th Smart Grid Conference, SGC 2020, 2020, doi: 10.1109/SGC52076.2020.9335761.
- [64] A. A. Abdelsalam, A. A. Salem, E. S. Oda, and A. A. Eldesouky, "Islanding Detection of Microgrid Incorporating Inverter Based DGs Using Long Short-Term Memory Network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106471–106486, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3000872.
- [65] S. B. A. Bukhari, K. K. Mehmood, A. Wadood, and H. Park, "Intelligent islanding detection of microgrids using long short-term memory networks," *Energies*, vol. 14, no. 18. 2021. doi: 10.3390/en14185762.
- [66] A. K. Özcanlı and M. Baysal, "A novel Multi-LSTM based deep learning method for islanding detection in the microgrid," *Electric Power Systems Research*, vol. 202, no. August 2021, 2022, doi: 10.1016/j.epr.2021.107574.
- [67] B. Özcanlı, Asiye Kaymaz and M. Baysal, "Islanding detection in microgrid using deep learning based on 1D CNN and CNN-LSTM networks," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 110456, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100839>.
- [68] S. D. Kermany, M. Joorabian, S. Deilami, and M. A. S. Masoum, "Hybrid Islanding Detection in Microgrid with Multiple Connection Points to Smart Grids Using Fuzzy-Neural Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2640–2651, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2617344.
- [69] D. Mlakic, H. R. Baghaee, and S. Nikolovski, "A Novel ANFIS-based Islanding Detection for Inverter Interfaced Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2859360.
- [70] H. R. Baghaee, D. Mlakic, S. Nikolovski, and T. Dragicevic, "Anti-Islanding Protection of PV-Based Microgrids Consisting of PHEVs Using SVMs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp. 483–500, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2924290.
- [71] V. R. Reddy and E. S. Sreeraj, "A Feedback-Based Passive Islanding Detection Technique for One-Cycle-Controlled Single-Phase Inverter Used in Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6541–6549, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2938464.
- [72] S. A. Chavoshi, R. Noroozian, and A. Emiri, "Islanding detection of synchronous distributed generation resources using AdaBoost algorithm," *International transactions on electrical energy systems*, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1002/etep.
- [73] J. Ke, Z. Zhengxuan, Y. Zhe, F. Yu, B. Tianshu, and Z. Jiankang, "Intelligent islanding detection method for photovoltaic power system based on Adaboost algorithm," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 18, pp. 3630–3640, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6841.
- [74] S. Admasie, S. Basit, A. Bukhari, T. Gush, R. Haider, and C. H. Kim, "Intelligent Islanding Detection of Multi-distributed Generation Using Artificial Neural Network Based on Intrinsic Mode Function Feature," vol. XX, no. Xx, pp. 1–10, doi: 10.35833/MPCE.2019.000255.
- [75] F. Hashemi, M. Mohammadi, and A. Kargarian, "Islanding detection method for microgrid based on extracted features from differential transient rate of change of frequency," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 4, pp. 891–904, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0795.
- [76] M. Bakhshi, R. Noroozian, and G. B. Gharehpetian, "Islanding detection scheme based on adaptive identifier signal estimation method," *ISA Transactions*, vol. 71, pp. 328–340, 2017, doi: 10.1016/j.isatra.2017.08.020.
- [77] M. O. Faruque et al., "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 63–73, 2015, doi: 10.1109/JPETS.2015.2427370.
- [78] S. C. Paiva, R. L. de A. Ribeiro, D. K. Alves, F. B. Costa, and T. de O. A. Rocha, "A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121. 2020. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106032.
- [79] R. Bakhshi-Jafarabadi, J. Sadeh, and M. Popov, "Maximum power point tracking injection method for islanding detection of grid-connected photovoltaic systems in microgrid," *IEEE Transactions*

- on Power Delivery, vol. 36, no. 1, pp. 168–179, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2976739.
- [80] A. Hoke, A. Nelson, B. Miller, S. Chakraborty, F. Bell, and M. McCarty, “Experimental Evaluation of PV Inverter Anti-Islanding with Grid Support Functions in Multi-Inverter Island Scenarios,” no. July, p. 69, 2016.
- [81] A. F. Hoke, A. Nelson, S. Chakraborty, F. Bell, and M. McCarty, “An Islanding Detection Test Platform for Multi-Inverter Islands Using Power HIL,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7944–7953, 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2801855.
- [82] A. Yılmaz and G. Bayrak, “A new signal processing-based islanding detection method using pyramidal algorithm with undecimated wavelet transform for distributed generators of hydrogen energy,” *International Journal of Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.114.
- [83] P. Buduma, S. J. Pinto, and G. Panda, “Wavelet based Islanding Detection in a Three-Phase Grid Collaborative Inverter System using FPGA Platform,” *India International Conference on Power Electronics, IICPE*, vol. 2018-Decem, pp. 2–7, 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709550.
- [84] B. K. Chaitanya, A. Yadav, and M. Pazoki, “Reliable Islanding Detection Scheme for Distributed Generation Based on Pattern-Recognition,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 8, pp. 5230–5238, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3029675.
- [85] Q. Cui, K. El-Arroudi, and G. Joós, “Real-time hardware-in-the-loop simulation for islanding detection schemes in hybrid distributed generation systems,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 12, pp. 3050–3056, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1562.
- [86] P. Kumar, V. Kumar, and R. Pratap, “FPGA implementation of an Islanding detection technique for microgrid using periodic maxima of superimposed voltage components,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 9, pp. 1673–1683, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5914.
- [87] P. Agnihotri and S. Biswas, “A novel CSoDoA based passive islanding detection technique for multi-DER AC microgrid control,” *Advanced Control and Automation Technologies*, vol. 5, no. 1, 2023.
- [88] M. Kumar and J. Kumar, “Islanding event detection technique based on change in apparent power in microgrid environment,” *Electrical Engineering*, 2023, doi: 10.1007/s00202-023-01750-5.
- [89] M. Kumar and J. Kumar, “A Solution to Islanding Event Detection Using Superimposed Negative Sequence Components-Based Scheme,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, doi: 10.1007/s13369-023-07787-9.
- [90] M. B. Shamseh, R. Inzunza, and T. Ambo, “A Novel Islanding Detection Technique Based on Positive-Feedback Negative Sequence Current Injection,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 8611–8624, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3146342.

İç Mimarlık Ve Tasarım Ofisindeki İşgörenlerin Çalışma Alanı Memnuniyetini Etkileyen Verimlilik Faktörleri

Tahsin ÇETİN^{1*}  Nilay GÖRMÜŞ¹  Mehmet ÇOLAK¹ 

¹Muğla Sıtkı Koçman University, Technology Faculty, Department of Woodworking Industrial Engineering, Muğla, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/06/2023
Revision: 08/08/2023
Accepted: 15/08/2023

Keywords

Ergonomics
Interior Design Office
Design Office
Productivity
Office Productivity

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/06/2023
Düzeltilme: 08/08/2023
Kabul: 15/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ergonomi
İç Mimarlık Ofisi
Tasarım Ofisi
Verimlilik
Ofiste Verimlilik

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmayla, insan, mekân ve ergonomik kullanım sorunlarını yenilikçi bir bakış açısıyla inceleyerek, günümüz ve gelecek kaygısıyla kapsamlı araştırmalar yapmak ve tüm ergonomik farklılıkları ortaya koymaya çalışmaktır ve verimlilik faktörlerini araştırmaktır. / This study examines the problems of human, space and ergonomic use from an innovative point of view, making extensive researches with the concern of today and the future, trying to reveal all ergonomic differences and investigating productivity factors.



Şekil A: Çalışma Alanı Tasarımsal Örnekleri / Figure A: Workspace Design Examples

Önemli noktalar (Highlights)

- Ergonomi konusunun mimari tasarımlarda önemi / The importance of ergonomics in architectural designs
- Çalışma koşullarının ergonomik olarak incelenmesi / Ergonomic Inspection of the Working Environment
- İç mimarlık ve tasarımcı ofisinde verimliliğe etki eden genel faktörler / General factors affecting productivity in interior architecture and designer offices

Amaç (Aim): İç Mimarlık ve Tasarım ofisinde ergonomi dahil verimliliği etkileyen faktörlerin tespit edilmesidir. / Determining the factors affecting productivity, including ergonomics, in an Interior Architecture and Design office.

Özgünlük (Originality): Çalışma alanından memnuniyet ve bu memnuniyetin demografik ve tanımlayıcı değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediğidir. / Satisfaction with the study area and whether this satisfaction differs according to demographic and descriptive variables.

Bulgular (Results): İşgücü verimliliğini etkileyen motivasyon faktörleri çeşitlilik göstermekte ve önemli görülmektedir. / Motivational factors affecting labor productivity vary and are considered important.

Sonuç (Conclusion): İşverenlerin, çalışanların verimliliğini artırmak için uygun ekipmanları, malzemeleri ve ergonomik ofis mobilyalarını sağlamaları ve bu faktörleri dikkate alarak çalışma ortamlarının iyileştirilmesine katkı sağlamaları önemlidir. / It is important for employers to provide the appropriate equipment, materials and ergonomic office furniture in order to increase the productivity of the employees and to contribute to the improvement of the working environment by taking these factors into account.



Factors Affecting Workspace Satisfaction and Productivity of Employees in Interior Design and Architecture Offices

Tahsin ÇETİN^{1*} Nilay GÖRMÜŞ¹ Mehmet ÇOLAK¹

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, ağaçşeri endüstri Mühendisliği, Muğla, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/06/2023
Revision: 08/08/2023
Accepted: 15/08/2023

Keywords

Ergonomics
Interior Design Office
Design Office
Productivity
Office Productivity

Abstract

The aim of this research is to examine the productivity factors that affect the workplace satisfaction of the employees in interior architecture and design offices, including ergonomic factors. The impact of behavioral factors as well as physical factors has been investigated. In addition, it has been determined whether work area satisfaction varies according to demographic and descriptive variables. The research involved questioning interior design and architectural firms through computer-based survey statements, and the data obtained was analyzed with using IBM SPSS 22.0 programme. In the first part of the study, descriptive variables related to the demographics and productivity of interior designers and architects were discussed. In the next stage, it was determined whether work area satisfaction varies according to various variables. In the final part of the study, the variables that can be related to work area satisfaction were determined by Chi-square test results. This study is important in terms of revealing how ergonomics has evolved with flexible working conditions and technological developments to increase productivity in office environments, identifying factors related to work area satisfaction, and comprehensively examining the factors that affect productivity.

İç Mimarlık ve Tasarım Ofisindeki İşgörenlerin Çalışma Alanı Memnuniyetini Etkileyen Verimlilik Faktörleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/06/2023
Düzeltilme: 08/08/2023
Kabul: 15/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ergonomi
İç Mimarlık Ofisi
Tasarım Ofisi
Verimlilik
Ofiste Verimlilik

Öz

Bu araştırmanın amacı, iç mimarlık ve tasarım ofislerindeki işgörenlerin çalışma alanı memnuniyetini etkileyen verimlilik faktörlerini, ergonomik faktörleri de dahil ederek incelemektir. Fiziksel faktörlerin yanı sıra davranışsal faktörlerin de etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, çalışma alanı memnuniyetinin demografik ve tanımlayıcı değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediği de belirlenmiştir. Araştırma, iç mimarlık ve tasarım ofislerine bilgisayar ortamında anket ifadeleri sorularak, elde edilen veriler IBM SPSS 22.0 programında analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, iç mimarlık ve tasarımcıların demografik ve verimlilik ile ilgili tanımlayıcı değişkenleri ele alınmıştır. Sonraki aşamada, çalışma alanı memnuniyetinin çeşitli değişkenlere göre farklılaşıp farklılaşmadığı belirlenmiştir. Çalışmanın son kısmında, çalışma alanı memnuniyeti ile bağ oluşturabilecek değişkenlerin neler olduğu Ki kare testi sonuçları ile belirlenmiştir. Bu çalışma, ofis ortamında verimliliği artırmak için ergonominin esnek çalışma koşulları ve teknolojik gelişmelerle nasıl evrimleştiğini ortaya koyması, çalışma alanından memnuniyetle bağlantılı faktörlerin belirlenmesi ve verimliliği etkileyen faktörlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi açısından önemlidir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İç mimarlık mesleği, geçmişten günümüze süregelen bir süreçte, yaratıcı düşüncelerini ortaya koyabilmesi için iç mimarlar için uygun bir ofis ve sağlıklı bir iş ortamı gibi ergonomik koşulların önemini vurgulamıştır. Bir iç mimarın, tasarım sürecinde verimli olabilmesi için zihninde hiçbir soru işareti bulunmamalıdır. Aksi takdirde,

problemler ofisteki verimliliği olumsuz etkileyerek sahada yapılan işlere de yansiyabilir.

İç mimarlık, mimari mekânlar içerisinde, estetiksel, fonksiyonel, kullanışlı ve yapısal ölçüt kriterlerine uygun en optimum tasarımları sunmak için çözümler üreten bir meslektir. İç mimarlar, müşterilerine yeni, ergonomik ve ekonomik

çözümler sunmak için alternatif tasarımlar yaparak mekânların organizasyonuna katkı sağlıyorlar.

Ofislerde işgörenlerin bulunduğu ortamda verimliliğini artırmak için çeşitli stratejiler uygulanabilir. Ofis ortamının günümüz şartları ve imkânları ölçüsünde güncel olması işgören memnuniyetini sağlayan önemli faktör olabilmektedir. Ayrıca işletmeler, üretim süreçlerini optimize ederek ve iş akışlarını daha teknolojik hale getirerek verimliliklerini artırabilirler. Ayrıca, çalışanların eğitim ve gelişimlerine önem vererek, işlerini daha iyi yapmalarını sağlayabilirler. Teknolojik yenilikleri takip ederek ve uygulayarak da verimliliklerini artırmak mümkündür.

İşletmelerdeki çalışanların etkili bir şekilde görevlerini yerine getirebilmeleri için bir dizi faktörün bir araya gelmesi gerekmektedir. Ofisler, kurumlar veya organizasyonların hizmet sunduğu mekânlar olan işyerleri, çalışanların büyük bir zaman dilimini geçirdiği yerler olduğundan, çalışma ortamlarının ve koşullarının, çalışanların ihtiyaçlarına uygun ve işlerini rahatlıkla icra edebilecekleri şekilde düzenlenmiş olması son derece önemlidir. İş ofislerinin verimliliği üzerindeki en kritik etkenlerden biri, çalışma alanlarının ergonomik olarak düzenlenmesidir. Bu fiziksel düzenlemeler, çalışanların sağlığını, psikolojik durumunu ve iş verimliliğini doğrudan etkilediğinden, çalışma mekânlarının ergonomik prensiplere uygun şekilde tasarlanması ve düzenlenmesi gerekmektedir. Sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturmak, ergonomik tasarım ilkelerine dayalı olarak yapılacak düzenlemeler ve ergonomik ürünler kullanarak mümkündür. Bu gerekliliklerin göz ardı edildiği işletmelerde, beklenen iş verimliliği ve kişisel etkinlik sağlanamayabilmekte ve çalışanların sağlık sorunları riski de o denli artabilmektedir.

Günümüzün modern iş dünyasında, işletmeler artık ergonomi kavramına büyük bir önem vermektedir. Ergonomi, çalışanlarla iş arasında bir denge sağlayarak iş verimini ve performansını etkileyen bilim dalıdır. Fiziksel olarak rahat bir ortamda çalışmanın, iş uyumunu ve tatminini artırarak çalışanların iş psikolojisini olumlu şekilde etkilediği bilinmektedir. Ergonomik faktörlerin göz önünde bulundurulması, potansiyel iş kazalarının önlenmesine de yardımcı olmaktadır. Ergonomi kavramı, yalnızca mekân tasarımını değil, aynı zamanda iş ortamının koşullarını da detaylıca kapsar. Bu koşullar, aydınlatma, gürültü, havalandırma, sıcaklık, nem, toz, titreşim gibi unsurları içerir ve iş yapılan göreve ve çalışanlara uygun şekilde düzenlenmelidir. İş ortamında

sıcaklık, nem, hava sirkülasyonu, partikül madde, zararlı gazlar, buharlar, duman, gürültü, titreşim, yetersiz aydınlatma gibi etmenler, iş verimini etkileyerek insan sağlığı ve güvenliği açısından çeşitli sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, ergonomik prensiplere dayalı olarak tasarlanmış ve düzenlenmiş iş ortamları, hem çalışanların iş memnuniyetini ve verimini artırabilir hem de sağlık ve güvenlik risklerini en aza indirebilir.

Bu makalenin amacı, insan, mekân ve ergonomik kullanım sorunlarını yenilikçi bir bakış açısıyla inceleyerek, günümüz ve gelecek kaygısıyla kapsamlı araştırmalar yapmak ve tüm ergonomik farklılıkları ortaya koymaya çalışmaktır ve verimlilik faktörlerini araştırmaktır. Malzeme ve teknoloji alanındaki gelişmeleri ofis-mekân ve donanım tasarımlarında değerlendirerek, bilimsel literatür taramalarıyla desteklenmesi hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE RESEARCH)

İç mekan tasarımı, insanların yeme, içme, yatma ve depolama gibi temel ihtiyaçlarını karşılamak için ilk çağlarda kendilerine ait mekanları düzenlemeye başlamalarıyla ortaya çıkan bir kültürdür [1]. Bu kültür, teknoloji gelişimi ile birlikte 17-18. yüzyıllar da tasarım anlayışını bütünleştirerek konut ve mobilyalarda da yansımalarıyla devam etmiştir.

17. yüzyılın sonlarından itibaren, iç mekân tasarımı alanında meslek eğitimine ağırlık verilerek akademik eğitimler ön plana çıkmaya başlamıştır. Endüstri Devrimi ile birlikte 19. yüzyılda teknik gelişmeler yaşanarak, iç mekân tasarımında biçimsel ve işlevsel öncelikleri sorgulayan akımların ortaya çıkması ve yaygınlaşması, bu alanda eğitim programlarının ortaya çıkmasına yol açmıştır. İlk başlarda meslek eğitimi kurslarla verilmiş olsa da, mesleğin gelişimi ile birlikte eğitim alanında da gelişmeler görülmeye başlanmıştır. 20. yüzyılda, iç mimarlık meslek dalı olarak tanınmaya başlamış, profesyonel uygulamalar yapılmaya başlanmış ve iç mekân tasarımı akımları ve uygulamaları ile uluslararası bir biçime dönüşmüştür [2].

İç mimarlık terimi, birçok kişi tarafından aşına olunan bir terimdir. İç mimarlar, müşterilerin evleri için mobilya, duvar kaplamaları ve renk şemaları seçmelerine yardımcı olan, sanatsal bir göze sahip profesyonellerdir. Televizyonda yayınlanan “Trading Spaces” ve “Extreme Home Makeover” gibi tasarım programlarına dayanarak, iç mimarların müşterilerin evlerinin komple

rekonstrüksiyonu için çalıştığı düşünülebilir. İç mimarlar, binaların iç mekanlarını mümkün olduğunca işlevsel, güzel ve anlamlı kılmak için planlama ve yönlendirme işlevlerini üstlenirler. İç tasarımın geniş doğası göz önüne alındığında, benzer konularla uğraşan diğer kariyerlerden ayrımı zor olabilir. Bu nedenle, iç mimarlık hem akademik bir program hem de profesyonel bir kariyer planlama gerektirir. Akademik bir müfredatta, sanat, mimari, insan ekolojisi ve ev ekonomisi gibi çeşitli bölümlerde iç tasarım eğitimi verilmektedir [3].

Teknolojik gelişmelerin etkisiyle günümüzde işletme işlerinin ev, kafe, ulaşım araçları gibi farklı mekânlarda da yürütülebilmesi, mekân tanımlamanın önemini azaltmıştır. Bu durum, çağdaş büro anlayışını ofis kavramıyla bütünleştirmektedir. Ofis artık belgelerin, hesapların ve görsel malzemelerin toplandığı, depolandığı, iletildiği ve dağıtıldığı, bilgiye dayalı işlerin genel adı olarak tanımlanabilir [4].

Ergonomi, çalışanların iş ortamıyla uyumunu inceleyen ve bu uyumun sağlanması için gerekli önlemleri kapsayan bir disiplin dalıdır [5]. Bu ilişkiler, çalışanların fiziksel ve işletme çevresiyle, yaptıkları işleriyle ve iş yapılan mekânların dinamik etkileşimleriyle ilgilidir. Ergonominin amacı, çalışanların daha rahat, güvenli, sağlıklı, verimli ve etkin olmalarını sağlamaktır ve bu amaç doğrultusunda, insanın kendine has niteliklerini ve yeteneklerini araştırarak işin insana uyumunu ya da insanın işe uyumunu sağlayan önlemleri belirlemeye çalışır [6, 7]. Ergonomi, işletmelerde iş verimliliğinin artırılması için gereklidir ve çalışanların sağlığını korumak, iş kazalarını önlemek, iş yükünü dengeli bir şekilde dağıtmak, işletme maliyetlerini düşürmek gibi faydaları vardır. Bu nedenle, işletmelerin ergonomik koşullar sağlaması ve çalışanların ergonomiye uygun bir şekilde çalışmalarını sağlaması oldukça önemlidir.

Günümüzde, teknolojik ve işkolundaki yenilikçi gelişmelerle birlikte, işletmelerin ihtiyaçlarını karşılayan ve çalışanların çalışma istekliliğini artıran bir büro ofis mekânında çalışmak oldukça önemlidir. İyi tasarlanmış bir çalışma ortamı, çalışma verimliliğini ve işletme bağlılığını artırarak, çalışanların üretken, dikkatli ve yenilikçi olabilmelerini sağlamaktadır. Son zamanlarda ofis iş ortamı tasarımlarına bakıldığında, gelişme sürecindeki tüm ofis teknolojilerinin ve ofis tasarım fikirlerinin odağında; çalışanların bilgiye kolayca ulaşmasına olanak tanıyan, esnek, sağlıklı, güvenilir ve akıllı sistemlerin önemi vurgulanmaktadır [8]. Bu sayede, çalışanlar işletmenin ihtiyaçlarını

karşılatabilecekleri modern ve işlevsel bir ofis ortamında çalışarak, işlerini daha verimli bir şekilde yapabilmektedirler.

Verimlilikle ilgili literatürde farklı tanımlamalar yapılmıştır. Verimlilik, "kişilerin daha az çaba harcayarak ürettikleri çıktı miktarı" olarak tanımlanabilir [9]. Verimliliği, "bir çalışanın bir saatte ürettiği çıktı kalitesi dikkate alınarak" tanımlamıştır [10]. Başka bir tanıma göre verimlilik, "kalite dahil artan işlevsel ve kurumsal performans" olarak açıklamaktadır [11]. Ayrıca, verimliliği basit bir şekilde, elde edilen faydanın maliyetine oranı olarak da tanımlamak mümkündür [12]. Genel anlamda verimliliği aynı girdiyle birden fazla çıktı alabilmek elde edebilmek şeklinde ifade edilebilir.

Ofis ortamı ve verimlilik arasındaki ilişki, uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırmalar ile birlikte birçok kurum, çalışanların verimliliklerini artırmak ve çalışanlarını ellerinde tutmak için yeni tasarım ve teknikler denemektedirler. Bu şekilde, üretkenlik ve iş tatminini artırmak için ofis ortamının düzenlenmesinde çalışan ihtiyaçları giderek daha çok dikkate alınmaktadır [13]. Ancak, ofis ortamlarında kullanılan araç ve gereçlerin insanın özelliklerine göre tam olarak tasarlanmaması, uygun olmayan çevre koşulları ve insanın psikososyal yönünün ihmal edilmesi gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, çalışma ortamında huzursuzluğu ve tatminsizliği meydana getirirken aynı zamanda iş kazaları ve meslek hastalıklarını arttırarak işlerin verimliliğinin düşmesine neden olabilmektedir [14].

Ofis mobilyalarının her açıdan ergonomik kullanımlara uygun malzemelerden yapılmalıdır. Yeni ofis tasarımları için akademik personelin görüş ve önerilerinin alınması, personelin üretkenliğini ve çalışmalarının etkinliğini arttıracaklarını belirtmiştir [15].

Çalışma yerlerinin ergonomik açıdan yeterli koşulları araştırılırken, fiziksel çevre koşulları, çalıştıkları ofisin dekorasyon uyumu, mobilya renklerinin uyumu ofiste, ofiste bulunan mobilyaların kullanışlılığı, işle ilgili yerlere yakınlık araç gereç (fotokopi, yazıcı vb.) ve kişisel eşyaların çalışma odasında ihtiyaç duyduğu alanların yeteri kadar fazla olması iş performansını etkilediği düşünülmektedir [16].

ASID (Amerikan Toplum İç Mimarları) tarafından yürütülen bir çalışmaya göre, fiziksel ofis ortamı performansı ve iş tatmini açısından en önemli üç faktörden biridir [17]. Araştırmaya katılanların

%39'u işlerinden ve ofis ortamlarından memnun olurken, %50'si daha iyi ofis koşullarına sahip bir kurumda çalışmayı tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Bu nedenle, işletmelerin çalışanlarının ihtiyaçlarını karşılamak ve verimliliği artırmak için ofis ortamlarını düzenlemeleri önemlidir. Bu düzenlemeler, çalışanların işlerine daha fazla bağlanmalarına, motivasyonlarının artmasına ve dolayısıyla iş performanslarının ve tatminlerinin artmasına yardımcı olabilir [13].

Gensler adlı bağımsız bir araştırma firması, 2006 yılında Amerika'daki ofis ortamları ile ilgili bir çalışma yürütmüştür [12]. Bu çalışma, ofis tasarımı, iş tatmini ve verimlilik arasındaki ilişkiye odaklanmıştır. Ankete katılanların %90'ı ofis tasarımının kendi verimliliklerini etkilediğini düşündüklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, daha iyi tasarlanmış bir ofis ortamıyla verimliliklerini %21 oranında artırabileceklerini ifade etmişlerdir. Ankete katılanların %67'si bir çalışma arkadaşı ile yakın çalıştıklarında daha verimli olduklarını söylerken, %92'si ise daha iyi bir ofis tasarımının kurumun kendi pazar alanında daha rekabetçi hale getirebileceğini düşündüklerini belirtmişlerdir.

Leaman tarafından yürütülen bir araştırma, ofis ortamı, çalışanların memnuniyetsizliği ve verimlilikleri arasında bir ilişki olduğunu incelemiştir. Çalışmanın sonucuna göre, çalışanların bulunduğu ortamda sıcaklık, havalandırma, termal konfor şartları, ışık, ses ve gürültü seviyelerinden memnuniyetsiz olmaları, bu olumsuz ofis ortamının verimliliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir [18].

Brill tarafından yapılan bir çalışmada, ofis tasarımının verimliliği arttırmak için kullanılabileceği belirtilmiştir. Mobilya, gürültü, esneklik, rahatlık, iletişim, ışıklandırma, sıcaklık ve havalandırma faktörleri, verimliliği etkileyen en önemli faktörler olarak sıralanmıştır. Bu faktörlerin iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmış ve fiziksel ofis

ortamının iyileştirilmesiyle çalışan verimliliğinin %5 ile %10 aralığında artırılacağı öngörülmüştür [19]. Stup ise çalışanların performansını etkileyen birden çok faktör tanımlamıştır. Bu faktörler arasında fiziksel ofis ortamı, donanım, anlamlı iş, performans beklentisi, performansa yapılan geri bildirim, ödüllendirme sistemi, tutum ve davranışlar gibi faktörler yer almaktadır [20].

Coy ve Evans tarafından yapılan çalışmada, uygun bir fiziksel ofis ortamının çalışanların işlerini stresiz bir şekilde yapabilmeleri için önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca, makalelerinde fiziksel ofis ortamı elemanlarının, ofis ortamındaki iletişim ağının gelişmesinde ve çalışan ilişkilerinde önemli bir rol oynadığını belirtmektedirler [21].

Amir, Pakistan'daki özel sektörde yaptığı çalışmada, kurumların başarıya ulaşmak için hedeflerinden birisinin de fiziksel ofis ortamının düzenlenmesi olması gerektiğini vurgulamıştır. Çalışma ortamı genellikle fiziksel ofis ortamı olarak ele alınmakla birlikte, son zamanlarda davranışsal ofis ortamının verimlilik veya performans üzerindeki etkisine de odaklanan araştırmalar yapılmaktadır [22]. Örneğin, davranışsal ofis ortamı bileşenlerinin verimliliğe en büyük etkinin kaynağı olduğunu belirtmiştir [23]. 2000'den fazla çalışana sahip bir kamu kuruluşundaki ofis ortamlarının, çalışanların performans seviyeleri üzerindeki etkilerini ve motivasyon faktörlerini araştırmıştır [24]. Araştırmasında, anket yöntemini kullanarak, davranışsal ofis ortamının kariyer hedefleri, performans geri bildirimi, rol tanımı, tanımlı süreçler, teşvik/ödül sistemi, yönetici desteği, danışmanlık/koçluk, uygulama fırsatı ve yardımcı kılavuzlar gibi unsurlarını ele almıştır. Yazar, araştırmasının analizinde, fiziksel ve davranışsal ofis ortamının, çalışanların motivasyonu ve verimliliği üzerinde kritik bir rol oynadığı sonucuna varmıştır. Bu çalışmalarla ilgili olarak kronolojik değerlendirme aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir [25];

Tablo 1. Ergonomik Çalışma ve Verimlilik Literatürü (Ergonomic Operation and Productivity Literature)

Yazarlar	Konusu	Yöntemi	Sonuçları
[26]	Ofis Ortamında İşlevsel Ve Fiziksel Değişkenlerin Çalışanlara Etkisi	Faktör Analizi	Katılımcıların, estetik ve dekorasyona önem verdiği tespit edilmiştir.
[27]	Otel İşletmelerinde Mutfak Donanımı	Frekans Analizi	Fiziksel koşulların yeterli olmadığı tespit edilmiştir.
[28]	Ofis Ortamlarının Verimliliği Arttırmaya Yönelik Tasarlanması	Regresyon Analizi	Kapalı ortam ve havalandırmanın iş stresi ve memnuniyeti üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir
[29]	Hemşireler İçin Yoğun Bakım Üniteleri	Frekans Analizi	Fiziksel koşul ve donanımın ergonomik olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 1 devamı. Ergonomik Çalışma ve Verimlilik Literatürü (Ergonomic Operation and Productivity Literature)

[30]	MYO Öğrencilerinin Staj Yaptıkları Büroların Ergonomi ve Verimlilik İlişkisinin İncelenmesi	Frekans Analizi	Sosyal programlardaki öğrencilerin, teknik programdakilere göre daha iyi ergonomik koşullara sahip olmuştur.
[31]	Büroların Ergonomik Açıdan İncelenmesi	Frekans Analizi, Pearson Korelasyon.	Kullanılan malzemelerin ergonomik olmadığı tespit edilmiştir.
[32]	Çağrı Merkezi Çalışanlarının Çalışma Ortamı	Frekans Analizi	Katılımcıların genel aydınlatmadan memnun olmadığı tespit edilmiştir.
[33]	Ofis Ortamlarının Çalışanlara Etkisi	Frekans Analizi	Katılımcıların ergonomik bir faktör olan gürültü düzeyinden rahatsız oldukları tespit edilmiştir.
[34]	Çalışma Koşullarının Ergonomik Açıdan İncelenmesi	Puanlama	Diğer koşullar dikkate alındığında çevresel koşulların geri planda tutulduğu tespit edilmiştir.
[35]	Çalışma Koşullarındaki Fiziksel Faktörlerinin Ergonomik Analizi	Frekans Analizi	Çalışma ortamındaki havalandırma ve aydınlatmanın ergonomik olmadığı tespit edilmiştir.
[36]	Ergonomik Gelişmenin Çalışanların Verimliliğine Etkisi	Frekans Analizi	Fiziksel koşulların iyileştirilmesi ve geliştirilmesinin çalışan verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir.

Bu araştırmayla yukarıda bahsedilen literatür araştırmasından hareketle, İç Mimarlık ve Tasarım ofisinde ergonomi dahil verimliliği etkileyen faktörlerin tespit edilmesi, çalışma alanından memnuniyet ve bu memnuniyetin demografik ve tanımlayıcı değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediği belirlenmeye çalışılmıştır. Anket çalışmamız Türkiye’de 2023 yılı da dahil olmak üzere iç mimarlık alanında aktif faaliyet gösteren basit tesadüfi yöntemle seçilen 165 adet işletmeyi kapsamaktadır. Çalışmamızda iç mimarlık sektörünü tercih etmemizin sebebi olarak ergonomi konusunun mimari tasarımlarda önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmasıdır. Araştırma hipotezleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

H1: Çalışma alanı memnuniyeti cinsiyete göre farklılık göstermektedir.

H2: Çalışma alanı memnuniyeti medeni duruma göre farklılık göstermektedir.

H3: Çalışma alanı memnuniyeti yaşa göre farklılık göstermektedir.

H4: Çalışma alanı memnuniyeti mesleğe göre farklılık göstermektedir.

H5: Çalışma alanı memnuniyeti hizmet süresine göre farklılık göstermektedir.

H6: Çalışma alanı memnuniyeti ofiste verimliliği artırmak için yapılması gerekenlere göre farklılık göstermektedir.

H7: Çalışma alanı memnuniyeti işyerindeki verimliliği %100 sağlamanın mümkünatına göre farklılık göstermektedir.

H8: Çalışma alanı memnuniyeti ve evin ofise yakınlığı birbirine bağlıdır.

H9: Çalışma alanı memnuniyeti ve ofise ulaşım aracı birbirine bağlıdır.

H10: Çalışma alanı memnuniyeti ve ofise giderken içinde bulunulan duygu durumu birbirine bağlıdır.

H11: Çalışma alanı memnuniyeti ve gün içinde ofisten çıkmaya sabırsızlanma birbirine bağlıdır.

H12: Çalışma alanı memnuniyeti ve seçim fırsatı olsa aynı ofiste çalışma isteği birbirine bağlıdır.

H13: Çalışma alanı memnuniyeti ve ücret yeterliliği birbirine bağlıdır.

H14: Çalışma alanı memnuniyeti ve ücret şekli birbirine bağlıdır.

H15: Çalışma alanı memnuniyeti ve hafta sonu çalışma birbirine bağlıdır.

H16: Çalışma alanı memnuniyeti ve ofis büyüklüğü birbirine bağlıdır.

H17: Çalışma alanı memnuniyeti ve ofis iç tasarımının odaklanma etkisi birbirine bağlıdır.

H18: Çalışma alanı memnuniyeti ve iş ortamı temizliği birbirine bağlıdır.

H19: Çalışma alanı memnuniyeti ve mesai arkadaşları ile işveren ilişkilerinin seviyesi birbirine bağlıdır.

H20: Çalışma alanı memnuniyeti ve öğle arasında değerlendirme şekli birbirine bağlıdır.

H21: Çalışma alanı memnuniyeti ve yöneticilerin yükselme fırsatı vermesi birbirine bağlıdır.

H22: Çalışma alanı memnuniyeti ve fazla proje çizildiğinde takdir edilme durumu birbirine bağlıdır.

H23: Çalışma alanı memnuniyeti ve az proje çizildiğinde uyarılma durumu birbirine bağlıdır.

H24: Çalışma alanı memnuniyeti ve proje bittikten sonraki duygu durumu birbirine bağlıdır.

Bu çalışmada, iç mimarlık sektörünün tercih edilme sebepleri arasında ergonomi konusunun mimari tasarımlarda önemli bir faktör olması ve literatür bakımından bu alandaki çalışmalara örneklik oluşturabilmesi yer almaktadır. Ergonomin tasarımla yakından ilişkili olması ve bu alandaki çalışmalara fazlaca ihtiyaç olmasıyla birlikte, çalışma akademik anlamda toplum üzerinde farkındalık oluşturarak ergonomi alanına dikkat çekmeyi amaçlamaktadır.

3. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Araştırma verilerinin toplanmasında anket tekniği kullanılmıştır. Anket tekniğinin seçilmesinin nedeni, aynı meslek grubundan çok sayıda verinin kısa zamanda kolayca ve ekonomik toplanabilmesi olmuştur. Çalışmanın evreni Türkiye'deki iç mimarlık firmaları olarak belirlenmiş ve basit tesadüfi yöntemle seçilen 165 işletmenin sorumlularına internet üzerinden ulaşılarak anket yapılmıştır. Anket, evrenin 2023 yılı dahil olmak üzere aktif faaliyet gösteren işletmelerine yönelik olarak hazırlanmış ve toplam 33 ifade içermiştir. Anket ile iç mimarlık ve tasarımcı ofisinde genel olarak verimliliğe etki eden faktörler kurulan hipotezler çerçevesinde belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın demografik ve tanımlayıcı değişkenlerine yönelik ifadelerin güvenilirliği Cronbach Alfa katsayısı ile hesaplanmıştır. Çoklu cevap içeren tanımlayıcı ifadelerin Cronbach Alfa güvenilirlik katsayısı 0,767 olarak hesaplanmıştır. Diğer 19 bağımsız ifadenin Cronbach Alfa güvenilirlik katsayısı ise 0,738 olarak hesaplanmış ve ölçeğin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları, iç mimarlık ve tasarım ofislerinde verimliliğe etki eden faktörlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu çalışma, iç mimarlık sektöründeki ergonomiye ilişkin çalışmalara bir örneklik teşkil etmektedir. Bu nedenle, iç mimarlık ve tasarım ofislerindeki yöneticiler, çalışanlar ve diğer ilgili kişiler için faydalı bir kaynak olabilir.

Çalışma kapsamında evren, Türkiye'deki ticaret odaları veya ticaret ve sanayi odalarında "Mesleki, Bilimsel ve Teknik Faaliyetler" grubunda "74.10.01" NACE kodu ve "İç mimarların faaliyetleri (iç dekorasyon dahil)" adıyla faaliyet gösteren iç mimarlık işletmeleri olarak ele alınmıştır. İstenen niteliklere sahip Türkiye geneli (Büyükşehir İlleri İstanbul, Ankara, İzmir hariç) toplam 345 işletme olduğundan bu işletmelere ulaşılarak anket uygulanmıştır. Araştırma yığındaki oran üzerine olduğundan örnek çapına ilişkin;

$$n = \frac{N \cdot z^2 \cdot p \cdot q}{N \cdot d^2 + z^2 \cdot p \cdot q}$$

formülü ile hesaplanmıştır.

N: Yığın çapıdır. Bu çalışmada N=345'dir. z: Güvenirlik için z tablo değeridir. %95 güvenirlik için z tablo değeri 2 alınabilir. z = 2, d: Duyarlılık, bu çalışmada duyarlılık %10 olarak alınmıştır. P:p+q=1 olması koşulu ile yığımda istenen özelliği gösteren işletmelerin oranını ifade eder. Örnek çapı bulma uygulamalarında örnek çapını maksimum yapmak için p=q=0,5 alınır; n: seçilecek örneğin çapıdır. Bu açıklamalara göre en az yeterli örnek çapı; n=165'tir ve sonuçlar bu oranlar nispetinde değerlendirmeye alınmalıdır. Baz alınan işletme sayısı göz önüne alındığında yapılan anket sayısı istatistiksel olarak 0.05 güven aralığındadır. Ana kütlelin tamamına ulaşamama bir çalışma kısıtı olarak ifade edilebilir.

Anket sorularının ölçeği, 2008 yılında "Büro Yerleşimi ve Ergonomisi (Kamu Kurumlarında Bir Uygulama)" adlı çalışması [37], 2016 yılında gerçekleştirdikleri "Büro Ortamlarının Çalışana Etkisi Üzerine Bir Araştırma: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Örneği" adlı çalışması [33] ve 2001

Yılında yayınlanan "Büro Ortamındaki İşlevsel ve Fiziksel Etmenler, Bu Etmenlerin Çalışanlar Üzerindeki Etkileri ve Bir Araştırma" [26] adlı makalesinde kullanılan anket sorularından esinlenerek hazırlanmıştır. Anketler, söz konusu sektöre uygulanmadan önce uzman görüşleri de alınarak hazırlanmıştır. Bu kaynaklara atıflarda bulunarak, ölçeğin bilimsel geçerliliği ve güvenilirliği hakkında bilgi verilmiştir. Araştırmacılar tarafından çalışmamız kapsamında çeşitli ölçeklerden yararlanılarak alınan sorular Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırmaları Etik Kurul biriminden (220020-2) protokol karar no'lu olarak Etik Kurul İzni alınarak uygulanmıştır.

3.1. Araştırma Hipotezlerinin Analizi (Analysis of Research Hypotheses)

Toplam 24 hipotez, literatürden elde edilen bilgilere dayanarak IBM SPSS 22 istatistik paket programı kullanılarak test edilmiştir. Normal dağılım gerektiren analizlerde, çarpıklık-basıklık katsayılarına bakılmıştır [38, 39]. Her iki katsayı da ± 2 değerini aşmıyorsa, veri dağılımı normal kabul edilmiştir. Ancak normal dağılım kararını vermek için ortalama ve medyanların birbirine yakınlığı, histogram, varyans katsayısı, detrended Q-Q plot ve Kolmogorov-Smirnov testi kullanılmıştır.

Farklılıkları incelemeye yönelik tüm analizlerde öncelikle parametrik olanları tercih edilmiştir. İlgili testlerden bağımsız örneklem t-testi ve tek yönlü varyans analizi (One Way Anova) yapılmıştır. Ancak, gerekli ön şartlar oluşmadığında ilgili testlerin parametrik olmayan karşılıkları tercih edilmiştir. Parametrik testlerde, öncelikle varyansların anlamlılık durumuna bakılmış ve H_0 hipotezi kabul edildiği durumlarda işlem sonlandırılmıştır ($p > 0,001$). H_0 hipotezi reddedildiğinde ($p < 0,001$), varyansların homojenliği ön şartı aranmıştır. Varyansların homojenliği, seçilecek Levene testlerinin (Post Hoc) seçilmesinde etkilidir. Varyansların homojenliği testinin sonucu $p < 0,001$ ise Tamhane's T2 testi, $p > 0,001$ olması durumunda ise Scheffe testi kullanılmıştır [40].

Bağımsız örneklem t-testinin non-parametrik karşılığı olan "Two-Independent Samples Test" (Mann Whitney U), ön şartların en az birinin yokluğunda kullanılmıştır. En az üç değişkenli ifadelerde, One Way Anova testi kullanılmıştır. Testin kullanılmasına engel oluşturacak ön şartların en az biri olmadığında, yerine non-parametrik karşılığı olan "K Independent Samples Test" (Kruskal Wallis -H) testi kullanılmıştır. Bu

testlerde farklılığın kaynağını bulmak için Mann Whitney U ikili karşılaştırmalarından yararlanılmıştır. Tüm analizlerde $p = 0,05$ anlamlılık düzeyi kullanılmıştır.

Ki-kare testi, genellikle iki bağımsız niteliksel kriteri test etmek için kullanılan bir istatistik testidir [41]. Sıfır hipotezi (H_0), iki kriterin bağımsız olduğunu, araştırma hipotezi (H_A) ise iki kriter arasında bir ilişki olduğunu ifade eder. Ki-kare testi sonucunda hücrelerin %20'sinden fazlasında 5'ten küçük beklenen frekans var mı sorusu sorulur. Eğer cevap hayır ise, Pearson Ki-kare istatistiğinden yararlanılır. Eğer cevap evet ise, "the minimum expected count" (en küçük beklenen değer=EBD) değerine bakılır. $EBD < 5$ ise Fisher's exact test istatistiği kullanılır, $5 \leq EBD < 25$ ise "continuity correction" istatistiği kullanılır. $EBD \geq 25$ ise Pearson Ki-kare istatistiği kullanılır [41].

Ki-kare analizleri yapılırken yukarıdaki yöntemlere uygun olarak değerlendirme yapılmıştır.

4. BULGULAR (RESULTS)

4.1. Demografik ve Tanımlayıcı Değişkenlere İlişkin Bulgular (Findings Related to Demographic and Descriptive Variables)

Bu bölümde, araştırmaya katılanların demografik ve tanımlayıcı değişkenlerine ait frekans bulguları sunulmuştur. Ayrıca, farklılıkları inceleme ile bağımlılıkları incelemeye yönelik hipotez bulgularına da yer verilmiştir.

Katılımcıların cinsiyet dağılımına baktığımızda, %25,5'inin erkek ve %74,5'inin kadın olduğu belirlenmiştir. Kadın istihdamının yüksek oranda olması, kadınların bu sektörü çoğunlukla tercih ettiği bir meslek olduğu ve kadın istihdamının bu sektörde daha da yüksek oranda olabileceğidir. Katılımcıların yaş dağılımına baktığımızda, %67,3'ünün 18-25 yaş aralığında olduğu ve %32,7'sinin 26-35 yaş aralığında olduğu görülmüştür. Katılımcıların mesleklerine bakıldığında, iç mimarların %60,0'lık oranla ağırlıkta olduğu, inşaat mühendisi olanların %21,8 ve mimarların %10,9 oranında olduğu görülmüştür. Finans uzmanlarının oranı ise sadece %7,3'tür. Katılımcıların hizmet sürelerine baktığımızda, en fazla %70,9'luk oranla 1-2 yıl çalışanların bulunduğu, bunu %14,5'lik oranla 3-4 yıl çalışanlar, %7,3'lük oranla 5-6 yıl çalışanlar ve %7,3'lük oranla 7 yıl ve üzeri çalışanların izlediği görülmüştür. Anketi cevaplayanların %76,9'unun bekâr ve %23,1'inin evli olduğu belirlenmiştir. Aşağıdaki tablolarda tanımlayıcı değişkenlere ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 2. Çalışma Ortamında Önem Verilen Faktör (Factor Considered in the Working Environment)

Değişkenler	n	%
Aydınlatma	117	21,2
Isıtma ve havalandırma	117	21,2
Ergonomi	48	8,7
İş sağlığı ve güvenliği (İSG)	57	10,3
Ses ve gürültü	90	16,3
Temizlik	123	22,0
Toplam	552	100,0

Tablo 2'de çalışma ortamında çalışanların öncelik verdiği faktörlerin frekans ve yüzde dağılımları verilmiştir. Buna göre, çalışanların en çok önem verdiği faktörler sırasıyla temizlik (%22,0), aydınlatma (%21,2), ısıtma ve havalandırma (%21,2), ses ve gürültü (%16,3), iş sağlığı ve güvenliği (%10,3) ve ergonomi (%8,7) olarak belirlenmiştir. Tablo 2'deki bulgular, işyerlerinin çalışma ortamlarının iyileştirilmesi için yapılacak planlamalarda dikkate alınması gereken faktörleri ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Personel Motivasyon Etkinlikleri (Staff Motivation Activities)

Değişkenler	N	%
Eğitim programları	39	20,0
Yeme içme etkinlikleri	51	26,1
Dış mekan etkinlikleri	12	6,2
Etkinlik yok	93	47,7
Toplam	195	100,0

Tablo 3, personel motivasyon etkinlikleri hakkında bilgi vermektedir. Katılımcıların %47,7'si herhangi bir motivasyon etkinliğine katılmadıklarını belirtirken, %20'si eğitim programlarına katıldıklarını ve %26,1'i yeme içme etkinliklerine katıldıklarını ifade etmiştir. Dış mekan etkinliklerine katılım oranı oldukça düşüktür (%6,2).

Tablo 4. Ofiste Başarının Anlamı (The Meaning of Success in the Office)

Değişkenler	n	%
Mutluluk	84	18,1
Kaliteli proje üretmek	87	18,7
Toplumda kalıcı bir şey üretmek	96	20,6
Verimli olmak	102	21,9
Proje hedeflerine ulaşmak	96	20,6

Tablo 4, ofiste başarının anlamına ilişkin çalışanların farklı düşüncelerini ortaya koymaktadır. Katılımcıların %20,6'sı proje hedeflerine ulaşmayı ve toplumda kalıcı bir şey üretmeyi ofiste başarının anlamı olarak görmektedir. Ayrıca %21,9'u verimliliği ön plana çıkarmaktayken %18,7'si de kaliteli proje üretmeyi başarı saymaktadır. Mutluluk ise ofiste başarının anlamı olarak %18,1 oranında görülmektedir.

Tablo 5. Katılımcıların Verimliliğini Etkileyen Faktörler (Factors Affecting Participants Efficiency)

Değişkenler	n	%
Mali motivasyon eksikliği ve ücret	153	26,2
Hava koşulları	36	6,2
Kalite	54	9,2
Dar alanda çalışma	48	8,2
Kapalı alanda çalışma	36	6,2
Sosyal etkinlik eksikliği	63	10,8
Devamsızlık	33	5,6
Malzeme eksikliği	21	3,6
Çalışan memnuniyetsizliği	72	12,3
Ülke şartları	6	1,0
Tecrübe eksikliği	51	8,7
Çalışan yaşı	12	2,1
Toplam	585	100,0

Tablo 5'te katılımcıların verimliliğini etkileyen faktörler ve yüzdelik değerleri verilmiştir. Mali motivasyon eksikliği ve ücret, en büyük etkiyi yaratan faktör olarak ortaya çıkıyor (%26,2). Çalışan memnuniyetsizliği de verimliliği azaltan önemli bir faktördür (%12,3). Sosyal etkinlik eksikliği, dar alanda çalışma ve kalite de verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları (%10,8, %8,2 ve %9,2) belirlenmiştir. Bununla birlikte, hava koşulları, kapalı alanda çalışma ve malzeme eksikliği gibi faktörlerin verimlilik üzerinde daha az etkisi olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Katılımcıların İşgücü Verimliliğini Etkileyen Motivasyon Faktörleri (Motivation Factors Affecting Participants' Labor Efficiency)

Değişkenler	n	%
Finansal motivasyon eksikliği	129	21,9
Fazla mesai	105	17,9
Ödeme gecikmesi	87	14,8
Eğitim eksikliği	66	11,2

Tablo 6 devamı. Katılımcıların İşgücü Verimliliğini Etkileyen Motivasyon Faktörleri (Motivation Factors Affecting Participants' Labor Efficiency)

Yeme içme yerlerinin eksikliği	87	14,8
İşgücü yükselme eksikliği	57	9,7
Ulaşım aracı sağlanamaması	57	9,7
Toplam	588	100,0

Tablo 6, katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen motivasyon faktörlerini göstermektedir. Toplam 588 katılımcıdan elde edilen verilere göre, finansal motivasyon eksikliği (%21,9) en yüksek oranda etkili faktördür. Fazla mesai (%17,9) ve ödeme gecikmeleri (%14,8) de işgücü verimliliğini etkileyen önemli faktörlerdir. Eğitim eksikliği (%11,2) ve yeme içme yerlerinin eksikliği (%14,8), işgücü yükselme eksikliği (%9,7) ve ulaşım aracı sağlanamaması (%9,7) da katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen diğer faktörler arasındadır.

Tablo 7. Katılımcıların İşgücü Verimliliğini Etkileyen Güvenlik Faktörleri (Safety Factors Affecting Participants Labor Efficiency)

Değişkenler	n	%
Kötü havalandırma	75	17,9
Yetersiz aydınlatma	105	25,0
Gürültü	93	22,1
Kötü hava koşulları	63	15,0
Güvenlik önlemlerine dikkat etmeme	48	11,4
Kaza riski	36	8,6
Toplam	420	100,0

Tablo 7, katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen güvenlik faktörlerini göstermektedir. Toplam 420 katılımcıdan elde edilen verilere göre, yetersiz aydınlatma (%25,0) en yüksek oranda etkili faktördür. Gürültü (%22,1) ve kötü havalandırma (%17,9) da işgücü verimliliğini etkileyen diğer

önemli faktörlerdir. Kötü hava koşulları (%15,0), güvenlik önlemlerine dikkat etmeme (%11,4) ve kaza riski (%8,6) de katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen faktörler arasındadır.

Tablo 8. Katılımcıların İşgücü Verimliliğini Etkileyen Kalite Faktörleri (Quality Factors Affecting Participants Labor Efficiency)

Değişkenler	n	%
Ekipman verimsizliği	81	23,9
Malzeme eksikliği	93	27,4
Aynı projeyi yeniden yapma	90	26,5
Ofis donanımının ergonomik eksikliği	75	22,1
Toplam	339	100,0

Tablo 8, katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen kalite faktörlerini göstermektedir. Toplam 339 katılımcıdan elde edilen verilere göre, malzeme eksikliği (%27,4) en yüksek oranda etkili faktördür. Aynı projeyi yeniden yapma (%26,5) ve ekipman verimsizliği (%23,9) de işgücü verimliliğini etkileyen diğer önemli faktörlerdir. Ofis donanımının ergonomik eksikliği (%22,1) de katılımcıların işgücü verimliliğini etkileyen bir faktördür.

4.2. Farklılıkları İncelemeye Yönelik Hipotezlerin Bulguları (Findings of hypotheses to examine differences)

Bu bölümde, farklılıkları incelemeye yönelik testlerden elde edilen bulgulara göre araştırma hipotezlerinin desteklenip desteklenmediği ortaya konulacaktır. Tablolarda Çalışma Alanından Memnuniyet "ÇAM" olarak kısaltılmıştır. Tablo 8'deki veriler normal dağılım göstermediğinden [42] Mann-Whitney U testi tercih edilmiştir. Bu test için gerekli ön koşulların [42] sağlandığı görülmüş ve test uygulanmıştır. Aşağıdaki Tablo 9'de H1, H2 ve H3 hipotezlerinin Mann-Whitney U Analizi sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 9. H1, H2 ve H3 hipotezlerinin Mann-Whitney U analizi sonuçları (Results of Mann-Whitney U Analysis of Hypotheses H1, H2 and H3)

H. N	Değişkenler Gruplar	N	S.O.	S.T.	U	z	P	Açıklama (%5)	
H1	Cinsiyet	Kadın	123	77,37	9516,00	1890,000	-2,907	,004	p=,004<0,05
		Erkek	42	99,50	4179,00				
		Toplam	165						
H2	Medeni Durum	Evli	36	108,25	3897,00	1413,000	-4,022	,000	p=,000<0,05
		Bekar	129	75,95	9798,00				

Tablo 9 devamı. H1, H2 ve H3 hipotezlerinin Mann-Whitney U analizi sonuçları (Results of Mann-Whitney U Analysis of Hypotheses H1, H2 and H3)

		Toplam	165						
H3	Yaş	18-25 yaş	111	82,68	9177,00	2961,000	-,140	,889	p=,889>0,05
		26-35 yaş	54	83,67	4518,00				
		Toplam	165						

Tablo 9. H1, H2 ve H3 hipotezlerinin Mann-Whitney U testi sonuçlarını içermektedir.

H1 hipotezi, cinsiyetin işgücü verimliliğine etkisini test etmektedir. Kadın ve erkekler arasındaki işgücü verimliliği farklılıklarının Mann-Whitney U testi ile incelenmesi sonucunda, $p=0,004<0,05$ değerinde çıkmıştır. Bu da cinsiyetin işgücü verimliliğini etkilediği anlamına gelmektedir.

H2 hipotezi, medeni durumun işgücü verimliliğine etkisini test etmektedir. Evli ve bekar çalışanlar arasındaki işgücü verimliliği farklılıklarının Mann-Whitney U testi ile incelenmesi sonucunda,

$p=0,000<0,05$ değerinde çıkmıştır. Bu da medeni durumun işgücü verimliliğini etkilediği anlamına gelmektedir.

H3 hipotezi, yaşın işgücü verimliliğine etkisini test etmektedir. 18-25 yaş ve 26-35 yaş arasındaki çalışanlar arasındaki işgücü verimliliği farklılıklarının Mann-Whitney U testi ile incelenmesi sonucunda, $p=0,889>0,05$ değerinde çıkmıştır. Bu da yaşın işgücü verimliliğini etkilemediği anlamına gelmektedir. Aşağıdaki Tablo 10'da H4-H7 hipotezlerin tek yönlü varyans analizi (Kruskal Wallis -H) sonuçlarına yer verilmektedir.

Tablo 10. H4-H7 Arası Hipotezlerin Tek Yönlü Varyans Analizi (Kruskal Wallis -H) Sonuçları (One-Way Analysis of Variance (Kruskal Wallis -H) Results of Hypotheses H4-H7)

Değişkenler		Gruplar	N	Mean Rank	X²	d.f.	p
H4	Meslek	Finans	12	65,00	10,011	3	,018
		İç Mimar	99	89,27			
		İnşaat Mühendisi	36	83,75			
		Mimar	18	59,00			
		Toplam	165				
H5	Hizmet Süresi	1-2 yıl	117	78,92	10,380	3	,016
		3-4 yıl	24	83,75			
		5-6 yıl	12	83,75			
		7 yıl ve üzeri	12	120,50			
		Toplam	165				
H6	ÇAM Ofiste verimliliği artırmak için yapılması gereken önerileri	Çalışma koşulları iyileştirilmeli	75	67,40	18,435	3	,000
		Ofisin iç tasarım dekorasyonu iyileştirilmeli	18	96,00			
		Personel etkinlikleri düzenlenmeli	18	96,00			
		Ücretler artırılmalı	54	96,00			
		Toplam	165				
H7	İşyerindeki verimliliği % 100 sağlamanın mümkünatı	Hayır	63	85,43	2,489	2	,288
		Kısmen	30	91,10			
		Evet	72	77,50			
		Toplam	510				

*d.f.: degree of freedom (Serbestlik Derecesi)

Tablo 10, H4-H7 arasındaki hipotezlerin Kruskal-Wallis H tek yönlü varyans analizi sonuçlarını

içerir. H4 hipotezine göre, farklı meslek gruplarının verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İstatistiksel olarak anlamlı bir farklılık elde edilmiş ve finans mesleği grubunun verimlilik açısından diğer gruplara göre daha düşük olduğu görülmüştür.

H5 hipotezinde, farklı hizmet sürelerinin işgücü verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu hipotez için de istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık elde edilmiş ve 7 yıldan fazla hizmet süresi olanların, diğer gruplara göre daha yüksek bir verimliliğe sahip olduğu görülmüştür.

H6 hipotezinde, ofiste verimliliği artırmak için yapılması gereken öneriler incelenmiştir. İstatistiksel olarak anlamlı bir farklılık elde edilmiş ve personel etkinlikleri düzenlemek, ofis iç tasarımını değiştirmek veya çalışma koşullarını iyileştirmek yerine ücretlerin artırılmasının daha etkili olduğu görülmüştür.

H7 hipotezinde, işyerindeki verimliliğin tam olarak sağlanabilir olup olmadığı araştırılmıştır. Bu hipotez için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamsızdır, bu nedenle hiçbir grup diğerlerinden önemli ölçüde farklı değildir ve işyerindeki verimliliğin %100 sağlanmasının mümkün olmadığı sonucuna varılamamaktadır.

Belirlenen anlamlı farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını belirlemek için kullanılan ayrıca bir test yoktur. Bu amaçla meslek, hizmet süresi ve ofiste verimliliği artırmak için yapılması gerekenler önerileri değişkenlerine ayrı ayrı Mann Whitney-U testinde ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. İkili karşılaştırmalardan farklılığın meslek grupları için iç mimar ile mimar arasında iç mimar lehine

(U=567,000; z=-2,767; p=0,006), inşaat mühendisi ile mimar arasında inşaat mühendisi lehine (U=216,000; z=-2,184; p=0,029) gerçekleştiği bulunmuştur.

İkili karşılaştırmalardan farklılığın hizmet süresi grupları için hizmet süresi 1-2 yıl olanlar ile 7 yıl ve üzeri hizmet süresi olanlar arasında hizmet süresi 1-2 yıl olanlar lehine (U=360,000; z=-3,109; p=0,002), hizmet süresi 3-4 yıl olanlar ile 7 yıl ve üzeri olanlar arasında hizmet süresi 3-4 yıl olanlar lehine (U=72,000; z=-2,958; p=0,003) gerçekleştiği bulunmuştur.

İkili karşılaştırmalardan farklılığın ofiste verimliliği artırmak için yapılması gereken öneriler kapsamında çalışma koşulları iyileştirilmeli önerisi ile ofisin iç tasarım dekorasyonu iyileştirilmesi önerisi arasında çalışma koşulları iyileştirilmeli lehine (U=441,000; z=-2,459; p=0,014), çalışma koşulları iyileştirilmeli önerisi ile personel etkinlikleri düzenlenmeli önerisi arasında çalışma koşulları iyileştirilmeli lehine (U=441,000; z=-2,459; p=0,014), çalışma koşulları iyileştirilmeli önerisi ile ücretler artırılmalı önerisi arasında çalışma koşulları iyileştirilmeli lehine (U=1323,000; z=-3,699; p=0,000) gerçekleştiği bulunmuştur. Tablo 9'dan elde edilen bilgiler ışığında H4, H5 ve H6 hipotezleri desteklenirken H7 hipotez, desteklenmemiştir. Aşağıdaki tablolarda Fisher's Exact Test "FET" olarak kısaltılmıştır.

Tablo 11. Tanımlayıcı Değişkenlerin Çalışma Alanından Memnuniyet Bağı (Chi Square-Ki Kare) (The Satisfaction Link of the Descriptive Variables with the Study Area)

Çalışma Alanından Memnuniyet	Evin ofise yakınlığı		X ²	d.f. (s.d.)	p
	Hayır	Evet			
	12	6			
	39	18	7,587	2	,023
	42	48			
Memnun	93	72			
Değilim	Ofis ulaşım aracı			FET	
	Hususi araç	Toplu taşıma	Yürüyerek		
Kısmen Memnunum	0	18	0		
	18	39	0	20,231	,000
	24	54	12		
Memnunum	42	111	12		
TOPLAM	Ofise giderken içinde bulunulan duygu durumu			FET	
	Mutsuz	Nötr	Mutlu		
	12	6	0		
	6	33	18	24,870	,000
	18	42	30		

	36	81	48			
	Gün içinde ofisten çıkmaya sabırsızlanma			X²		
	Evet	Hayır				
	12	6				
	33	24		3,340	2	,188
	42	48				
	87	78				
	Seçim fırsatı olsa aynı ofiste çalışma isteği			X²		
	Hayır	Evet				
	18	0				
	27	30		16,147	2	,000
	48	42				
	93	72				
	Ücret yeterliliği			FET		
	Yetersiz	Yeterli				
	18	0				
	45	12		5,103		,089
	72	18				
	135	30				
	Ücret şekli			FET		
	Sadece aylık maaş	Maaş + her proje bitiminde prim	Maaş + prim + yemek	Maaş + prim + yemek + yol		
	18	0	0	0		
	24	15	0	18	38,783	,000
	36	18	18	18		
	78	33	18	36		
	Hafta sonu çalışma			FET		
	Cumartesi tam gün	Cumartesi yarım gün	Hafta sonu tatil			
Memnun Değilim	6	6	6			
	33	12	12	9,478		,046
Kısmen Memnunum	42	12	36			
	81	30	54			
Memnunum	Ofis büyüklüğü					
TOPLAM	2 oda, 1 mutfak, 1 tuvalet	3 oda, 1 top. salonu, 1 mutfak ve 1 tuvalet	4 oda ve daha fazlası			
	6	6	6			
	39	12	6	35,874		,000
	18	48	24			
	63	66	36			
	Ofis iç tasarımının odaklanmaya etkisi			FET		
	Etkilemez	Etkiler				
	0	18				
	6	51		5,795		,048
	18	72				
	24	141				
	İş ortamı temizliği			FET		
	Hayır	Evet				
	0	18				
	0	57		4,130		,095
	6	84				

		6	159			
		Mesai arkadaşları ve işveren ilişkileri seviyesi			FET	
		Kötü	İyi	Çok iyi		
		12	6	0		
		0	33	24	51,750	,000
		6	66	18		
		18	105	42		
		Öğle arası değerlendirme şekli			X²	
		Ofiste kalmayı tercih ediyoruz	Molaya çıkıyoruz			
		18	0			
		6	51	49,298	2	,000
		42	48			
		66	99			
		Yöneticilerin yükselme fırsatı vermesi			FET	
		Hayır	Kısmen	Evet		
		12	6	0		
		0	39	18	50,499	,000
		12	36	42		
		24	81	60		
		Planlanandan fazla proje çizildiğinde takdir edilme durumu			X²	
		Hayır	Evet			
		18	0			
		27	30	21,711	2	,000
		36	54			
		81	84			
Memnun Değilim	Planlanandan az proje çizildiğinde uyarılma durumu			FET		
		Hayır	Evet			
		0	18			
Kısmen Memnunum			6	51	2,457	,296
		12	78			
Memnunum			18	147		
		Proje bittikten sonraki duygu durumu			FET	
TOPLAM	Yeni projeye başlamak istemiyorum	Yeni projenin daha sonra gelmesini istiyorum	Sabırsızlanarak yeni proje gelmesini bekliyorum			
		12	6	0		
		18	15	24	41,831	,000
		6	42	42		
		36	63	66		

*d.f.: degree of freedom (Serbestlik Derecesi)

Tablo 11'e göre Ki kare ve Fisher's exact test sonuçları dikkate alındığında H11, H13, H18 ve H23 desteklenmez iken H8, H9, H10, H12, H14, H15, H16, H17, H19, H20, H21, H22 ve H24 hipotezleri desteklenmiştir. Bu sayede desteklenen hipotezlerde bulunan değişkenlerin çalışma alanı memnuniyeti ile bir bağı olduğu tespit edilmiştir. Desteklenmeyen hipotezlerdeki değişkenlerin

çalışma alanı memnuniyeti ile olan bir bağı tespit edilememiştir.

2. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER (RESULTS, DISCUSSION AND SUGGESTIONS)

Günümüzde, işletmelerin başarısını ölçmek için temel bir gösterge olan verimlilik, önemli bir konudur. İşletmelerin karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan biri, verimliliği artırmak ve

rekabet avantajı elde etmektir. Bu sebeple, işletmelerin temel görevlerinden biri, verimliliği artıracak tedbirler almak ve stratejiler uygulamak olmalıdır.

Bu stratejilerin uygulanması için işletmeler, atıfta bulunacakları kaynakları doğru bir şekilde seçmeli ve güncel bilgilere dayanmalıdır. Bununla birlikte, işletmelerin verimliliği artırmak için uygulayacakları stratejiler, işletmenin faaliyet gösterdiği sektöre ve özelliklerine göre değişebilir. Bu sebeple, işletmelerin, verimlilik artırıcı tedbirleri alırken, sektördeki en iyi uygulamaları takip etmeleri ve kendi özelliklerine uygun stratejiler belirlemeleri gerekmektedir.

Sonuç olarak, işletmelerin verimliliği artırarak rekabet avantajı elde etmeleri ve başarılı olmaları için, verimlilik artırıcı tedbirlerin alınması ve uygulanması kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, işletmelerin sektördeki en iyi uygulamaları takip etmeleri ve kendi özelliklerine uygun stratejiler geliştirmeleri gerekmektedir.

Bu araştırma, iş görenlerin motivasyonu, yeterli ücret düzeyi ve uygun işyeri ortamı düzenlemelerinin, iş verimliliğini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Ergonomik iyileştirmelerin yapılmasıyla birlikte, iş ve iş çevresinden duyulan memnuniyet ölçüsünde insanların daha verimli çalışabilecekleri gözlemlenmektedir. Ayrıca, işyeri ortamının ergonomikliği ile çalışanların verimliliğinin artması arasında bir ilişki olduğu vurgulanmaktadır.

Demografik değişkenler açısından bulgular değerlendirildiğinde katılımcılar arasında iç mimarların ağırlıklı olması, sektördeki iç mimarlık eğitim programlarına ve ilgili meslek kuruluşlarının çalışmalarına dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, çalışanların hizmet süresinin genellikle kısa olması, işletmelerin personel yönetimi ve kariyer planlama konularında daha fazla çaba göstermeleri gerektiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, araştırmanın sınırları da göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, araştırmaya sadece belirli bir bölgedeki iç mimarlık firmalarından katılımcılar seçilmiş olabilir, bu nedenle genellemeler yapmak doğru olmayabilir. Ancak yine de, bu bulgular mesleki uygulamalar ve araştırmalar için değerli bir bilgi kaynağı olabilir.

Çalışma ortamının temiz ve düzenli olması, çalışanların performansını ve motivasyonunu artırabilirken, aydınlatma ve ısıtma/havalandırma da çalışanların konforunu ve sağlığını etkileyen

faktörlerdir. İş sağlığı ve güvenliği ise iş kazalarının önlenmesi ve çalışanların sağlıklı bir ortamda çalışmalarını sağlayarak iş performansını etkileyebilir. Ses ve gürültü, özellikle endüstriyel alanlarda çalışanların maruz kaldığı bir faktör olduğundan, bu alanda çalışanların bu konuya hassasiyet göstermeleri gerekmektedir. Ergonomi ise, çalışanların fiziksel olarak rahat ve sağlıklı bir şekilde çalışmalarını sağlayarak, iş performansını ve verimliliğini artırabilir.

Araştırmanın bulguları personelin motivasyonunu artırmak için işverenlerin çeşitli etkinlikler düzenleyebileceğini göstermektedir. Eğitim programlarına katılım oranının yüksek olması, çalışanların kişisel ve mesleki gelişimlerine önem verdiklerini göstermektedir. Yeme içme etkinliklerine olan ilginin yüksek olması da iş yerinde sosyal etkileşime verilen önemi yansıtabilir.

Araştırmada ofiste başarının anlamına ilişkin çalışanların farklı düşünceleri olduğu belirlenmiştir. Mali motivasyon eksikliği ve ücret, verimlilikte en büyük etkiyi yaratan faktör olarak belirlenirken, çalışan memnuniyetsizliği de verimliliği azaltan önemli bir faktör olarak belirlenmiştir. Sosyal etkinlik eksikliği, dar alanda çalışma ve kalite de verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, hava koşulları, kapalı alanda çalışma ve malzeme eksikliği gibi faktörlerin verimlilik üzerinde daha az etkisi olduğu görülmektedir.

Araştırma sonuçları, katılımcıların işlerinde daha yüksek ücretlerin veya maddi ödüllerin motivasyonunu artırabileceğini göstermektedir. Çalışanların iş saatleri ve ödemeleri konusunda daha fazla esneklik ve düzenlilik talep edebileceği, çalışanların iş yerinde eğitim ve gelişim fırsatlarına erişimlerinin, sağlıklı yemek seçeneklerinin, işyerinde kariyer gelişimlerinin ve ulaşım sorunlarının çözümünün önemini göstermektedir. Bir başka deyişle işgücü verimliliğini etkileyen motivasyon faktörleri çeşitlilik göstermekte ve önemli görülmektedir. İşverenlerin, çalışanların bu faktörlere yönelik ihtiyaçlarını anlamaları ve iş yerinde bu ihtiyaçları karşılamak için uygun tedbirler almaları önemlidir. Araştırma bulguları ayrıca, işyerinde uygun aydınlatmanın çalışanların verimliliğini artırdığına ve sağlık ve güvenliklerini koruduğuna işaret etmektedir. Ek olarak çalışanların işyerinde daha sessiz ve rahat bir ortamda çalışmalarını gerektiğini ve sağlıklarını korumak için iyi bir havalandırmanın önemini göstermekte olup genel olarak işyerinde sağlık ve güvenlik koşullarının önemini vurgulamaktadır. İşverenlerin, çalışanların işyerinde güvenliği

sağlamak için uygun tedbirler almaları ve bu tedbirlerin uygulamasını sıkı bir şekilde takip ederek çalışma ortamlarını iyileştirmesi önemlidir.

Daha önce yapılan araştırmalardan elde edilen bulgulara göre, iş verimi ile ücret tatmini arasında anlamlı bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir ($p=0,036$, $p=0,010$). Bu sonuçlar, çalışanlara ödenen tatmin edici ücretin ve işyerinin fiziksel ortamının, çalışanların verimliliğini olumlu yönde etkileyen faktörler olduğunu göstermektedir. Özellikle ücret tatmini, çalışanların verimliliğini belirleyen en kritik faktör olarak öne çıkmıştır. Tatmin edici bir ücret alan çalışanlar, işlerine daha fazla bağlanmakta, işlerini sahiplenmekte ve sonuç olarak verimlilik düzeylerinde artış gözlemlenmektedir. Bu nedenle, işletme sahiplerinin çalışanlarına hak ettikleri ücretleri ödemesi, verimlilik açısından büyük bir öneme sahiptir. [43]. Başka bir çalışmada ise ücret ve çalışılan ortamda teknolojik imkânların verimlilik üzerinde pozitif etkisi olduğu belirlenmiştir [44]. Bu çalışmada da çalışanların işletmelerinden en çok istedikleri buldukları ortamın imkânları ölçüsünde görevlerini fazlasıyla yerine getirerek verimlilikleri ölçüsünde gelir elde etmeye çalışmak ve yaşamlarını idame ettirebilmektir. Bu bakımdan işletmeler ne kadar çalışanlarının çalışma alanını ve ücretlerini yüksek standartlarda tutarsa o denli verimlilik oluşabileceği ve ekonomik faydalar sağlayabileceğidir.

Yapılan bir başka araştırma sonucuna göre de; ofislerin estetik açıdan çekiciliği konusunda, çalışanların genel olarak orta düzeyde bir memnuniyet gösterdiği belirlenmiştir. İç mekan düzenlemesinin, araç gereçlerin iş gerekliliklerine uygunluğunun ve iş akışının yerleşimi ile alan kullanımının, çalışanlar arasında yüksek bir memnuniyet düzeyi oluşturduğu görülmektedir. Masa, sandalye gibi bazı ofis ekipmanlarının, vücut ölçülerine uyumlu olma konusunda ise ortalama bir memnuniyet söz konusudur. Bürolar arasındaki iş akışının doğru bir biçimde düzenlenmesi, kat ve odaların çalışanların ihtiyaçlarına uygun şekilde tasarlanması, ofis düzenlemelerini gösteren planların bulunması, gereksiz prosedürlerin ortadan kaldırılması, ikaz ve uyarı levhalarının varlığı ile sağlıklı yemeklerin hazırlandığı ortamların oluşturulması gibi konularda ise memnuniyet düzeyinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [45]. İş ortamından kaynaklı olumsuzluklar maalesef çalışanlar üzerinde negatif etki oluşturarak yaptıkları tüm iş süreçlerine yansımaya da sebep olabileceğidir. Burada önemli olan tartışma konusu ise iş görenlerin iş ortamından beklentileri ile işverenin vizyon misyonuna bağlı olarak

çalışanlarına sunmuş olduğu veya imkanlar ölçüsünde sunabileceği ofis ortam şartlarının kalitesiyle beklentilerini karşılayıp karşılayamamasıdır. Dolayısıyla ofis verimliliğinde çalışanların beklentileriyle ve işverenin imkanları da bir başka faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Araştırma sonuçları, işyerinde doğru, uygun ve yeterli malzemelerin, kaynakların sağlanmasının çalışanların verimliliğini artıracığına işaret etmektedir. Aynı projenin tekrar yapılması ise, zaman kaybına neden olabilir ve çalışanların motivasyonunu düşürebilir. Ayrıca, işyerinde uygun ergonomik ofis mobilyalarının sağlanmasının, çalışanların sağlığını ve rahatını korumalarına yardımcı olacağını ve çalışma verimliliğini artıracığını göstermektedir. Bir başka deyişle araştırma, işgücü verimliliğini etkileyen kalite faktörlerinin çeşitliliğini ve önemini göstermektedir. İşverenlerin, çalışanların verimliliğini artırmak için uygun ekipmanları, malzemeleri ve ergonomik ofis mobilyalarını sağlamaları ve bu faktörleri dikkate alarak çalışma ortamlarının iyileştirilmesine katkı sağlamaları önemlidir.

Araştırmada cinsiyetin ve medeni durumun işgücü verimliliğini etkilediği, yaşın ise işgücü verimliliğini etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan önceki bir çalışmada da bu faktörü destekleyen bir sonuca ulaşılmıştır. Evli Çalışanların verimlilikleri ve işe uyumları bekâr çalışanlara göre daha fazladır [43]. Bu faktör sektörlere bağlı olarak veya kişilerin diğer değişkenlerine bağlı olarak farklılıkta gösterebilir. Bu bakımdan bireylerin diğer değişkenleri dikkate alınarak yorumlanmalıdır.

Finans mesleği grubunun verimlilik açısından diğer gruplara göre daha düşük olduğu, 7 yıldan fazla hizmet süresi olanların, diğer gruplara göre daha yüksek bir verimliliğe sahip olduğu görülmüştür. Personel etkinlikleri düzenlemek, ofis iç tasarımını değiştirmek veya çalışma koşullarını iyileştirmek yerine ücretlerin artırılmasının daha etkili olduğu da araştırma sonuçları arasındadır. Ancak, işyerindeki verimliliğin %100 sağlanmasının mümkün olmadığı sonucuna varılamamaktadır.

Araştırmada çalışma alanı memnuniyetinin farklı faktörlere göre farklılık gösterdiği sonucu çıkarılabilir. Örneğin, cinsiyet, medeni durum, meslek, hizmet süresi, ofis verimliliğini artırmak için yapılması gerekenler, ofise ulaşım aracı, içinde bulunulan duygu durumu, aynı ofiste çalışma isteği, ücret şekli, hafta sonu çalışma, ofis büyüklüğü, ofis iç tasarımının odaklanma etkisi, mesai arkadaşları

ve işveren ilişkilerinin seviyesi, öğle arasını değerlendirme şekli, yöneticilerin yükselme fırsatı vermesi ve fazla proje çizildiğinde takdir edilme durumu, çalışma alanı memnuniyeti ile bağlantılıdır.

Ancak, çalışma alanı memnuniyetinin yaşa göre farklılık göstermediği, işyerinde verimliliği %100 sağlamanın mümkün olup olmamasına göre farklılık göstermediği, çalışma alanı memnuniyeti ve gün içinde ofisten çıkmaya sabırsızlanma arasında bir bağlantı olmadığı ve az proje çizildiğinde uyarılma durumu ile çalışma alanı memnuniyeti arasında bir bağlantı olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlar, işyerlerinin çalışanların memnuniyetini artırmak için farklı faktörlere odaklanması gerektiğini göstermektedir. Çalışanların çalışma alanı memnuniyetini artırmak için, özellikle desteklenen hipotezlerde bahsedilen faktörlerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılabilir.

Bir iş yerinde hafta sonu çalışma durumunda, çalışanların odaklanması ve mutluluğu iş verimliliği için önemli bir etkidir. Bu nedenle, hafta sonu çalışmalarında çalışanların motivasyonu yükseltmek için alınan ücret artırılabilir. Ancak, hafta sonları tatil yapılması durumunda çalışanların işlerine odaklanmaları ve mutlu olmaları daha kolay olabilir.

Ofis dışı etkinlikler, çalışanların mutluluğunu artırarak ofisteki verimliliği de artırabilir. İşgücü verimliliğinin ölçümü ve faktörlerin belirlenmesi yönetimin daha doğru kararlar almasına ve işletmenin başarısını artırmasına yardımcı olabilir.

İşletmelerin ve kamu kurumlarının çalışanların verimliliğini artırmak için motivasyon sağlamaya yönelik gereken önlemleri alması önemlidir. Bu konuda, işçi ve işverenlerin özel sektör ve kamu kurumları arasındaki işbirliği de önemlidir. Tüm bu konularla ilgili bilimsel çalışmalar da bu görüşleri desteklemektedir.

Sonuç olarak, işletmelerin rekabet avantajı elde etmeleri ve başarılı olmaları için verimlilik artırıcı tedbirlerin alınması ve uygulanması kritik önem taşır. Günümüz işletmelerine öneri olarak; sektördeki en iyi uygulamaları takip ederek ve kendi özelliklerine uygun stratejiler, vizyon misyonlar belirleyerek verimliliklerini daha da arttırabilecek olmalarıdır.

NOT (NOTE)

Bu çalışmanın pilot araştırma kısmı 5. Uluslararası Uygulamalı Mühendislik ve Doğa Bilimleri Konferansında (10-12.07.2023/Konya) sözlü olarak sunulmuş tam metin bildirinin örneklem sayısı, konusu, kapsam ve sınırlılığında artırılarak farklı yöntemlerle analiz edilerek genişletilmiş halidir.

The pilot research part of this study is the version of the full-text parts presented orally at the 5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (10-12.07.2023/Konya) which can be analyzed differently by increasing the number, subject, scope and limitation.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu çalışma için Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırmaları Etik Kurulu 30.11.2023 tarihli ve Protokol No:220020/2 kararı ile araştırmanın uygulanabilirliği için bilimsel araştırmalar etiği açısından izni bulunmaktadır.

In this study, Muğla Sıtkı Kocaman University Science and Engineering Sciences Research Ethics Committee decision dated 30.11.2023 and Protocol No: 220020/2 allowed the applicability of the research in terms of scientific research ethics.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT of INTEREST)

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





KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kilmer Rosamary K, Otie W. Designing Interiors, Holt, Rinehart and Winston Inc. USA. 1992.
- [2] Özsavaş U, Kaptan B. İçmimarlık Mesleği ve Eğitim Tarihi. Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi. Ekim 2018; 6(80), s: 436-444.
- [3] Ball Victoria K. Opportunities In Interior Design and Decorating Careers. USA: McGraw-Hill. 2002.
- [4] Köse Doğan R. Büro mekânlarında geleceğe yönelik yaklaşımlar. İçmimar Dergisi. 2013; (25):70-76.
- [5] Sluchak T. J. Ergonomics: origins, focus and implementation considerations. AAOHN Journal. 1992; 40(3):105-111.
- [6] Rowan M. P. Wright P. C. Ergonomics is Good for Business, Facilities. 1995; 13(8):18-25.
- [7] Erkan N. Ergonomi Verimlilik, Sağlık ve Güvenlik İçin İnsan Faktörü Mühendisliği, Ankara. 1996.

- [8] Karaoğlu Tekin Ö. Paylaşımlı ofislerin iç mekân tasarım anlayışları (Sanatta Yeterlik Tezi). Hacettepe Üniversitesi. Güzel Sanatlar Enstitüsü, Ankara. 2019.
- [9] Rollos M. Een gezond binnenmilieu betaalt zichzelf terug. *Praktijkboek Gezonde Gebouwen*. October. 1997; A2001-318.
- [10] Sutuermeister R. A. *People and Productivity*. 3rd edicion. NewYork. 1976.
- [11] Dorgan C.E. *Productivity Link to the Indoor Environment Estimated Relative to ASHRAE62-1989*. Proceedings of Health Buildings'94. Budapest. 1994; pp.461472.
- [12] Anonim1. *TheGensler Design+Performance Index*. The U.S. Workplace Survey. 2006a.
- [13] Stallworth. J.O.E. Kleiner B.H. *Recent Developments in Office design*. Journal off Facilities. 1996; 14(1/2). p:34-42.
- [14] Güler Ç. *Ergonomiye Giriş*. Ankara. 1997.
- [15] Karaman, A. *An Ergonomic Analysis of Physical Envionmental Conditions in Offices (Uşak University Academic Staff Example)*. Online Journal of Art and Design. 2020; 8(3). s:36-50.
- [16] Karaman, A. *Ofis ve Ofis Mobilyalarının Ergonomik Kriterler Açısından Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma: Uşak Üniversitesi Akademik Personel Örneği*. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi. 2020; 3(1):42-51.
- [17] Anonim 2. *American Society of Interior Designers. Recruiting and retaining qualified employeesbydesign*. Whitepaper. 1999.
- [18] Leaman A. *Dissatisfaction and office productivity*. Journal of Facilities Management. 1995; 13(2):3-19.
- [19] Brill M. Margulis S. Konar E. *Using office design to increase productivity*. Buffalo. NY: Westinghouse. 1985.
- [20] Stup R. *Control the factors that influence employee success*. Managing the Hispanic Work force Conference ornell University and Pennsylvania State University. 2003.
- [21] Coy, J. M. Evans, G. W. *Physical work environment*. In: J. Barling. E. K.Kelloway M. R. Frone (Eds.) *Handbook of Work Stress*. Thousand Oaks. CA: Sage Publication. 2005:219–245.
- [22] Amir F. *Measuring the impact of office environment on performance level of employees: A case of private sector of Pakistan*. 2010.
- [23] Haynes B. P. *An Evaluation of the Impact of the Office Environment on Productivity*. Journal of Facilities. 2008; 26(5/6): 178-19.
- [24] Chandrasekar, K. *Work place Environmentandits Impacton Organizational Performance in Public Sector Organizations*, International Journal of Enterprise Computing and Business Systems. 2011; Vol:1/1.
- [25] Tütüncü A. Bayraktar Y. Gönülaçan A. *Ergonomik Çalışma Ortamı Ve Verimlilik İlişkisi: Karadeniz Teknik Üniversitesi Akademik Personeli Üzerine Bir Araştırma*, Mehmet Akif Ersoy İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. Burdur. 2020; Cilt: 7/1:93-117.
- [26] Göral R. *Büro Ortamındaki İşlevsel ve Fiziksel Etmenler. Bu Etmenlerin Çalışanlar Üzerindeki Etkileri ve Bir Araştırma*, Ticaret ve Turizm Eğitim Fakültesi Dergisi. 2001; 4: 1-39.
- [27] Kalıncara V. Öktem Ş. *Otel İşletmelerinde Mutfak Donanımının Çalışanlara Uygunluğunun Ergonomik Olarak Değerlendirilmesi*. Akdeniz Ülkeleri Turizm Kongresi. Antalya. 2002; 1-10.
- [28] Roelofsen P. *The Impact of Office Environments on Employee Performance: The Design of the Workplace as a Strategy for Productivity Enhancement*. Journal of Facilities Management. 2002; 1(3): 247-264.
- [29] İlçe, A. Dramalı, A. *Hemşirelikte Araştırma Geliştirme Dergisi*. Hemşirelikte Araştırma Geliştirme Dergisi. 2010; 1:53-63.
- [30] Çakırel Y. Özdemir Karaca, P. Aydın Çakırel, Ö. Çakır, İ. *Meslek Yüksekokulu Öğrencilerinin Staj Yaptıkları Büroların Ergonomi-Verimlilik İlişkisi Açısından Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma*. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 2013; 1: 23-40.
- [31] Çetinkaya F. Ö. Düğer M. *Bürolarda Ergonomik Koşulların Çalışma Yaşamı Kalitesine Etkisi: Kırşehir Örneği*. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 2013; 1: 45-60.
- [32] Çelenk Kaya, E. Özyayın M. M. Ölmezoğlu N. İ. *Ergonomical Analysis of Work Environments of Customer Representatives Working in Call Centers*. Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2015; 7(1): 82-106.
- [33] Koçer S. Yazıcı, T. ve Ekinci D. K. *Büro Ortamlarının Çalışana Etkisi Üzerine Bir Araştırma: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Örneği*. Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi. Gümüşhane. 2016; C:4/2.
- [34] Çetinkaya F. Baykent G. *İşyeri Çalışma Ortamı Koşullarının Ergonomik Yönden İncelenmesi (Örnek: Şekerleme Firması)*. Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi. 2017; 15-31.

- [35] Kaynak K.Ö. Uluğtekin N.M. Çalışma Ortamındaki Fiziksel Faktörlerin Ergonomik Analizi: Dokuz Eylül Üniversitesi Hastanesi Örneği. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi. 2017; 6: 319-325.
- [36] Çelebi E.S. Ergonomik İyileştirmenin Çalışan Psikolojisi ve Verimliliğe Etkisi: Elektrikli Ev Aletleri Üreticisinde Bir Araştırma, Journal of Life Economics. 2018; 5(1): 83-94.
- [37] Çınar H. Büro Yerleşimi ve Ergonomisi (Kamu Kurumlarında Bir Uygulama) 7. Ulusal Büro Yönetimi ve Sekreterlik Kongresi Bildiri Kitabı. 22-24 Ekim 2008; 227-243. Trabzon.
- [38] Kline R. B. Principles and Practice of Structural Equation Modeling (Third Edition). New York: The Guilford Press. 2011.
- [39] Kunan J. A. An Introduction to Structural Equation Modelling for Language Assessment Research, Language Testing. 1998; 15(3): 295-332.
- [40] Otrar M. Yaşlılık ve Yaşlanmaya İlişkin Tutum Ölçeği: Geçerlik ve Güvenirlilik Çalışması. İstanbul University Journal of Sociology. 2016; 36(2): 527-550.
- [41] Güngör M. Bulut, Y. Ki-kare Testi Üzerine, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi. 2008; 84-89.
- [42] Arslan N. Psikolojik Danışmanlarda Tükenmişlik: Nitel Araştırma Örneği. 2018; Cilt: 8 Sayı:15:1005–1021.
- [43] Yumuşak S. İşgören Verimliliğini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesine Yönelik Bir Alan Araştırması. Süleyman Demirel Üniversitesi. İ.İ.B.F.Dergisi. 2008; C.13/3:241-251.
- [44] Yılmaz Y. İşgücü Verimliliğini Etkileyen Faktörlerin Analizi: Bütüncül Bit Yaklaşım. İstanbul Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü. Doktora Tezi. 2019.
- [45] Tütüncü A. Bayraktar Y. Gönülaçan A. Ergonomik Çalışma Ortamı Ve Verimlilik İlişkisi: Karadeniz Teknik Üniversitesi Akademik Personeli Üzerine Bir Araştırma. 2020; C:7/1:93-117.

Post-Treatment of Real Textile Wastewater by Using a Hybrid System Comprising of Electrocoagulation and Fenton-like Oxidation in the Presence of Perovskite/Activated Carbon Composite Catalyst

Özlem BULCA , Burcu PALAS , Süheyda ATALAY , Gülin ERSÖZ* 

¹Ege University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, İzmir, Turkey

Article Info:

Research article
Received: 03/10/2022
Revision: 14/02/2023
Accepted: 28/04/2023

Keywords

Real Textile Wastewater,
Electrocoagulation,
Fenton-like Oxidation,
Sequential Wastewater
Treatment,
Perovskite,
Biomass Derived Activated
Carbon

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/10/2022
Düzeltilme: 14/02/2023
Kabul: 28/04/2023

Anahtar Kelimeler

Gerçek Tekstil Atıksuları,
Elektrokoagülasyon,
Fenton Benzeri
Oksidasyonu,
Ardışık Atıksu Arıtım,
Perovskit,
Biyokütle Türevli Aktif
Karbon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Electrocoagulation and Fenton-like oxidation were applied sequentially to improve the quality and reusability of the treated textile wastewater. / Arıtılan tekstil atıksuyunun kalitesini ve tekrar kullanılabilirliğini artırmak için elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyonu ardışık olarak uygulanmıştır.

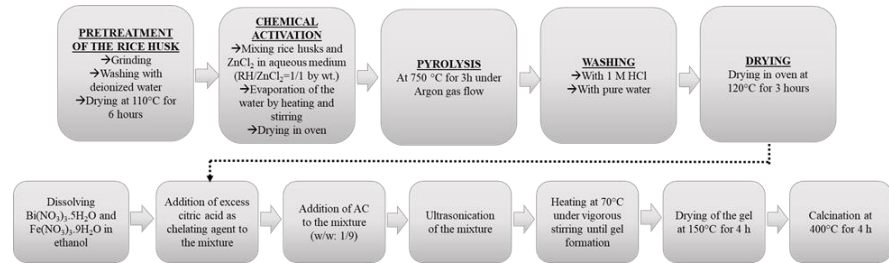


Figure A: Catalyst preparation steps /Şekil A: Katalizör hazırlama basamakları

Highlights (Önemli noktalar)

- Real textile wastewater was subjected to sequential electrocoagulation and Fenton-like oxidation. / Gerçek tekstil atıksuyu ardışık elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyonuna tabi tutulmuştur.
- Perovskite/rice husk based activated carbon composite catalysts were used in the Fenton-like oxidation process. / Fenton benzeri oksidasyonu prosesinde perovskit/pirinç kabuğu bazlı aktif karbon kompozit katalizörler kullanılmıştır.
- The optimum Fenton-like oxidation conditions were determined as 1.5 g/L catalyst loading, pH 7, and 2 mM H₂O₂ concentration. / Optimum Fenton benzeri oksidasyonu koşulları 1,5 g/L katalizör yüklemesi, pH 7 ve 2 mM H₂O₂ konsantrasyonu olarak belirlenmiştir.
- In the presence of BiNiO₃/RHAC catalyst 32.7% TOC removal was achieved at the optimum reaction conditions. / BiNiO₃/RHAC katalizör varlığında optimum reaksiyon koşullarında %32,7 TOK giderimi sağlanmıştır.

Aim (Amaç): The aim of this study is the use of biomass-based environmentally friendly catalysts and the development of effective hybrid wastewater treatment systems to increase the quality and reusability of real textile wastewater. / Bu çalışmanın amacı gerçek tekstil atıksuların kalitesini ve tekrar kullanılabilirliğini artırmak için biyokütle temelli çevre dostu katalizörlerin kullanılması ve etkili hibrit atıksu arıtım sistemlerinin geliştirilmesidir.

Originality (Özgünlük): The performances of BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts were compared in Fenton-like oxidation applied subsequent to electrocoagulation and the most suitable reaction conditions were determined. / Elektrokoagülasyon sonrası uygulanan Fenton benzeri oksidasyonunda BiFeO₃/RHAC ve BiNiO₃/RHAC katalizörlerin performansları karşılaştırılmış ve en uygun reaksiyon koşulları belirlenmiştir.

Results (Bulgular): 17% and 15.7% total organic removal efficiencies were achieved in electrocoagulation and Fenton-like oxidation processes, respectively, whereas the cumulative removal efficiency reached to 32.7%. / Elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyonu proseslerinde sırasıyla %17 ve %15,7 toplam organik giderim verimleri elde edilirken kümülatif giderim verimi %32,7'ye ulaşmıştır.

Conclusion (Sonuç): Perovskite/activated carbon composite materials have been effective in the treatment of industrial wastewater by using hybrid treatment technologies. / Perovskite/aktif karbon kompozit malzemeler, hibrit arıtma teknolojileri kullanılarak endüstriyel atıksuların arıtılmasında etkili olmuştur.



Post-Treatment of Real Textile Wastewater by Using a Hybrid System Comprising of Electrocoagulation and Fenton-like Oxidation in the Presence of Perovskite/Activated Carbon Composite Catalyst

Özlem BULCA , Burcu PALAS , Süheyda ATALAY , Gülin ERSÖZ*

¹Ege University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, İzmir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/10/2022
Revision: 14/02/2023
Accepted: 28/04/2023

Keywords

Real Textile Wastewater,
Electrocoagulation,
Fenton-like Oxidation,
Sequential Wastewater
Treatment,
Perovskite,
Biomass Derived
Activated Carbon

Abstract

A hybrid wastewater treatment method was used to improve the quality of the treated wastewater for possible reuses. Real textile wastewater was subjected to electrocoagulation and Fenton-like oxidation sequentially. In the Fenton-like oxidation process the performances of BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC (RHAC: Rice husk based activated carbon) catalysts were compared. BiNiO₃/RHAC was determined to be more effective in total organic carbon removal. A parametric study was carried out in the presence of the selected BiNiO₃/RHAC catalyst to investigate the effect of the catalyst loading, pH, and the oxidant dosage on total organic carbon removal. The most suitable reaction conditions were determined as 1.5 g/L of catalyst loading, pH 7, and 2 mM initial hydrogen peroxide concentration. 17% and 15.7% total organic removal efficiencies were achieved in electrocoagulation and Fenton-like oxidation processes, respectively, whereas the cumulative removal efficiency was 32.7%.

Gerçek Tekstil Atıksularının Perovskite/Aktif Karbon Kompozit Katalizör Varlığında Elektrokoagülasyon ve Fenton Benzeri Oksidasyondan Oluşan Hibrit Sistem Kullanılarak Son Arıtımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/10/2022
Düzeltilme: 14/02/2023
Kabul: 28/04/2023

Anahtar Kelimeler

Gerçek Tekstil Atıksuları,
Elektrokoagülasyon,
Fenton Benzeri
Oksidasyonu,
Ardışık Atıksu Arıtımı,
Perovskit,
Biyokütle Türevli Aktif
Karbon

Öz

Arıtılan atıksuyun kalitesini olası bir yeniden kullanım için iyileştirmek amacıyla bir hibrit atıksu arıtım yöntemi kullanılmıştır. Gerçek tekstil atıksuyu sırasıyla elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyonuna tabi tutulmuştur. Fenton benzeri oksidasyonu prosesinde BiFeO₃/RHAC ve BiNiO₃/RHAC (RHAC: Pirinç kabuğundan elde edilen aktif karbon) katalizörlerin performansları karşılaştırılmıştır. BiNiO₃/RHAC'nin toplam organik karbon gideriminde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Katalizör yüklemesinin, pH ve oksidan dozajının toplam organik karbon giderimi üzerine etkisini araştırmak için seçilen BiNiO₃/RHAC katalizör varlığında parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. En uygun reaksiyon koşulları 1,5 g/L katalizör yüklemesi, pH 7 ve 2 mM başlangıç hidrojen peroksit konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyonu proseslerinde sırasıyla %17 ve %15,7 toplam organik giderim verimleri elde edilirken kümülatif giderim verimliliği %32,7'dir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Water pollution is one of the major global challenges and environmental problems of the world. In recent years, minimization and reuse of water have gained importance and popularity due to decline in the clean water sources and increasing water pollution. Textile industry wastewater is one of the most significant contributor of water

pollution and approximately 17–20% of industrial water contamination arises from textile processing [1,2]. Textile industry effluents contain many complex chemicals affecting the aquatic organisms living in receiving water sources due to the large amount of chemical consumption in scouring, bleaching, mercerizing, warping, spinning, and dyeing processes.

The textile mill effluents are deeply colored and decrease photosynthetic activity by blocking sunlight penetration, which significantly reduces the amount of dissolved oxygen [3,4]. The effective treatment of textile industry wastewaters has a great significance to minimize harmful effects of contaminants.

Conventional physical, chemical and biological wastewater treatment processes often cannot achieve complete removal of contaminants from wastewaters. Classical chemical methods have some drawbacks including generation of larger quantities of sludge and higher salinity in the effluents. Biological methods are generally not adequate for the treatment of highly toxic wastewaters and the microorganisms are sensitive to environmental conditions [5].

Advanced oxidation processes (AOP) have the capability of degradation of persistent compounds present in the industrial wastewaters due to generation of highly oxidant radicals which converts the complex chemicals into simple harmless compounds [6]. These processes have the significant advantages over conventional methods due to the formation of strong reactive oxygen species such as hydroxyl radicals. Fenton oxidation is one of the most popular advanced oxidation methods due to its low cost, easy operation, high degradation rate, and ability to reach complete mineralization. The process is based on the formation of hydroxyl radicals, which have high oxidation capacity for the degradation of organic pollutants. Hydroxyl radicals are formed in the reactions between metal ions and hydrogen peroxide [7–9].

Electrocoagulation is an effective wastewater treatment technology due to combination of electrical and chemical methods. It has been applied for the removal a wide variety of pollutants including the organics, inorganics, metals and colloidal particles present in textile, pulp and paper, mining, and food industries [10–12]. Electrocoagulation is based on the formation of the coagulant material by electrical oxidation mechanisms through suitable electrodes in aqueous medium. The metal ions are transferred from anode surface to the aqueous medium by the current. At the same time, the water is reduced to hydrogen gas and hydroxyl ions. Consequently, metal hydroxides are produced as a coagulant material that have highly pollutant adsorption capacity [13]. Electrocoagulation is easy to implement, and require compact equipment and small amount of chemicals. Therefore, this method has economic

and environmental advantages compared to other more conventional techniques which need extensive use of chemicals. The combination of electrocoagulation and the Fenton process is extremely effective due to the formation of powerful oxidizing agents [14].

Electrocoagulation followed by Fenton oxidation is considered as excellent for the treatment of high-strength industrial wastewaters. Fenton oxidation can be ineffective for the treatment of intensively contaminated wastewaters. Initial electrocoagulation treatment reduces the pollutant load significantly [15]. In most of the sequential electrocoagulation and advanced oxidation studies, electrocoagulation is adopted as the pre-treatment followed by the Fenton oxidation. This combination is beneficial since the suspended solid and the colloid content of the wastewater is reduced by electrocoagulation. Therefore, the efficiency of the Fenton process can be improved remarkably. The sequential application of the electrocoagulation and Fenton processes is reported as effective for the treatment of dye containing wastewaters [16,17]. In addition, electrocoagulation can provide an efficient pre-treatment before Fenton oxidation. It may have a synergic effect since the residual metal remaining in the solution after electrocoagulation may serve as the catalyst for the Fenton oxidation reactions [18].

In order to use as catalyst in heterogeneous Fenton-like oxidation processes perovskites in the form of ABO_3 (A is a rare earth metal with large ionic radius or a post transition metal such as Bismuth; B is a transition metal with a small ionic radius) are known to be a good alternatives over other metal catalysts due to their resistance to high temperatures, high activity and easy separation from wastewater [19,20].

Development of low cost and effective catalysts is one of the main concern of advanced oxidation studies. In the present study $BiFeO_3/RHAC$ and $BiNiO_3/RHAC$ (RHAC: Rusk husk based activated carbon) were used as catalyst in Fenton-like oxidation process. In order to prepare eco-friendly catalysts by using low cost and nontoxic materials, rice husk was used as raw material in activated carbon preparation process. Several post-treatment methods have been applied sequentially to satisfy the wastewater discharge limits and to increase the quality of the treated wastewater for its possible reuse. Hybrid wastewater treatment systems comprising of electrocoagulation and advanced oxidation methods have been used effectively for the treatment of industrial wastewaters [18,21–25]. According to the literature survey on industrial

wastewater treatment, the application of Fenton-like oxidation in the presence of perovskite/activated carbon catalysts subsequent to electrocoagulation has not been tested so far. In this context, the main original approach of this study is the comparison of the performances of BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts and determination of the most suitable reaction conditions in Fenton-like oxidation subsequent to electrocoagulation.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Chemicals (Kimyasallar)

In-situ pre-treated real textile wastewater was provided from a textile factory in İzmir, Turkey. In

the pre-treatment step, physical, biological and chemical treatment methods were applied at the factory. Discharge properties of in situ pre-treated wastewater are shown in Table 1. Zinc chloride and hydrochloric acid (37%) were purchased from Merck to synthesize activated carbon from rice husk. Sulphuric acid (Merck, 95-97%) and sodium hydroxide (Merck, pure) were used for pH adjustment in Fenton-like oxidation process. Bismuth nitrate pentahydrate (98%), nickel nitrate hexahydrate (99–102%), iron nitrate nonahydrate (99–102%), and citric acid mono hydrate (99.5-100.5%) were supplied from Merck and used to synthesize BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC composite catalysts.

Table 1. Processing parameters (İşleme parametreleri)

Wastewater Characteristics		Value
TOC (mg/L)		30-32
COD (mg/L)		310
Turbidity (NTU)		4.9
Conductivity (mS/cm)		10
Salinity (ppt)		5.5
pH		8-8.5
Dissolved O ₂ (mg/L)		3.20
Color, m ⁻¹	436 nm	9.41
	525 nm	5.08
	620 nm	3.16

2.2. Catalyst preparation (Katalizör hazırlanışı)

The activated carbon used as catalyst support was prepared from rice husk by using zinc chloride as the activating agent. The weight ratio of the rice husk to zinc chloride was 1:1. The pyrolysis was performed at 750°C for 3 hours. BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts were synthesized by sol-gel method Bismuth nitrate pentahydrate, transition metal nitrate (nickel nitrate hexahydrate or iron nitrate nonahydrate), and citric acid monohydrate

were dissolved in ethanol solution. The molar ratio of Bi:M:Acid (M: Fe or Ni) was equal to 1:1:3. The required amount of RHAC was inserted into the mixture to obtain 10% perovskite and 90% activated carbon (by wt.) in the catalyst structure. The mixture was heated and stirred until the gel was formed. After drying, calcination was carried out at 400°C for 4 h [24]. The details of the catalyst preparation steps are shown in Figure 1.

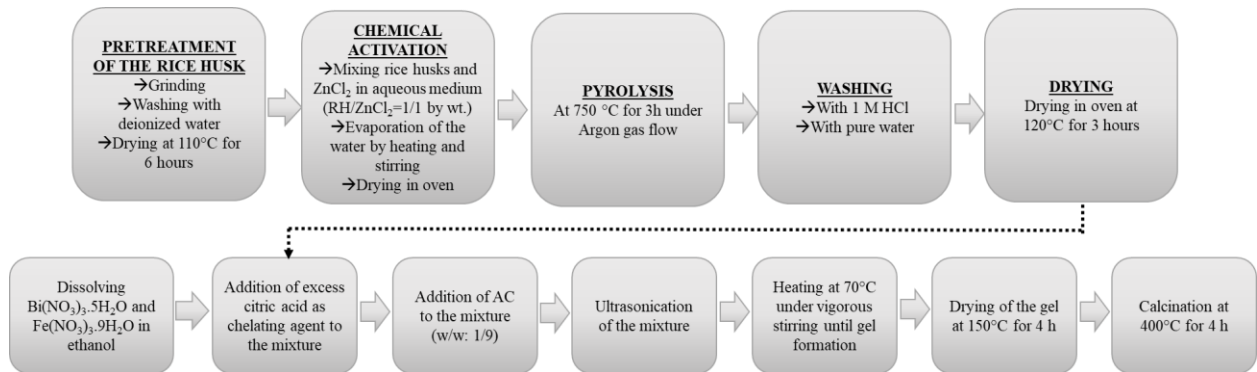


Figure 1. Catalyst preparation steps (Katalizör hazırlanış basamakları)

2.3. Experimental set-up and procedure (Deney düzeneği ve prosedürü)

In-situ pretreated textile wastewater was subjected to electrocoagulation and Fenton-like oxidation sequentially. In the electrocoagulation process Aluminum electrodes were used at a current density of 25 mA/cm² and pH=5 when the mixing rate was 220 rpm. The most operational conditions of electrocoagulation were determined in the previous study [26]. The initial TOC content of the wastewater supplied from the textile mill was 30-32 mg/L and the TOC was reduced to 24-26 mg/L after the application of electrocoagulation.

The photo Fenton-like oxidation experiments were performed in a beaker to treat 100 mL of wastewater taken from electrocoagulation effluent. A 100 Watt halogen lamp (Philips Plusline ES, 78 mm) was placed above the reaction medium and a water bath was used to keep the temperature at 25°C. Homogeneous mixing is maintained by using a magnetic stirrer. In a typical run, the pH of the wastewater is adjusted by using dilute sulphuric acid or sodium hydroxide solutions. Required amounts of catalyst and hydrogen peroxide are added into the wastewater simultaneously. At the end of 2 hours, samples are taken from the wastewater to analyze.

In a previous study, the pretreated textile wastewater was subjected to directly photo Fenton-like oxidation, after pH adjustment, 16.12% and 15.92% TOC removal was obtained in the presence and in the absence of visible light irradiation, respectively, by using BiFeO₃/activated carbon [27]. Additionally, in the preliminary studies, photo Fenton-like oxidation was applied after electrocoagulation and adsorption. In the photo Fenton-like oxidation step, the TOC removal efficiencies changed between 1.54% and 5.61% in the presence of BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts. Since the application of advanced oxidation after electrocoagulation and adsorption was not effective, and the influence of light irradiation was negligible in the previous studies, Fenton-like oxidation (without light irradiation) was applied subsequent to electrocoagulation for the post treatment of real textile wastewater in the present study. The electrocoagulation and advanced oxidation experiments were repeated three times.

2.4. Analysis (Analiz)

In order to determine the wastewater characteristics total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD), pH, concentration of dissolved oxygen, conductivity, color, and turbidity were measured.

Total organic carbon was determined by a Shimadzu TOC Analyzer. TOC removal efficiencies were calculated by using Equation 1:

$$\text{TOC \%} = \frac{(\text{TOC}_0 - \text{TOC}_F)}{\text{TOC}_0} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

Where TOC₀ and TOC_F are the initial and final total organic carbon contents in mg/L.

COD analysis was performed by using Spectroquant Merck COD cell tests, a NOVA 400 spectrophotometer, and a WTW thermoreactor.

Dissolved oxygen, conductivity, and pH were measured via a multimeter (WTW Multi 340i) whereas the turbidity was determined via a WTW Turbo 550IR.

The absorbance values at 436, 525, and 620 nm, which correspond to yellow, red, and blue colors, respectively, were measured in a 10S UV-VIS Spectrophotometer to determine the color.

The spectral absorption coefficient (SAC) is calculated according to the Equations 2-4.

$$\text{SAC}_{436} = \frac{A_{@436 \text{ nm}}}{d} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{SAC}_{525} = \frac{A_{@525 \text{ nm}}}{d} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\text{SAC}_{620} = \frac{A_{@620 \text{ nm}}}{d} \quad (\text{Eq.4})$$

A: Absorbance

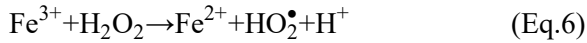
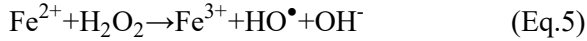
d: UV cuvette thickness, [m]

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

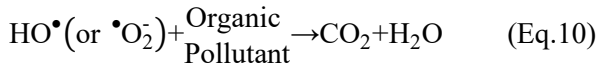
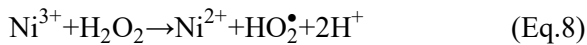
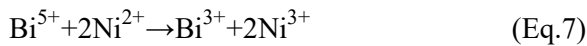
3.1. Catalyst screening (Katalizör seçimi)

In the catalyst screening study, Fenton-like oxidation performances of BiFeO₃-RHAC and BiNiO₃-RHAC catalysts were tested at two different catalyst loadings and pH values to select the most efficient catalyst. The effluent of the electrocoagulation process was used as the wastewater in the catalyst screening study.

During the Fenton-like oxidation the organic pollutants, ferric ions in the BiFeO₃/RHAC catalyst structure react with H₂O₂ to produce ferrous ions and hydroperoxyl radicals (Eq. 5). The ferric ions react with H₂O₂ to form more reactive hydroxyl radicals (Eq. 6).

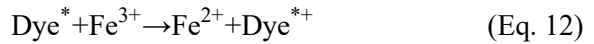


Bismuth metal ions with a high valence state react with Ni²⁺ and transfer to the previous valence state (Eq. 4), which have the ability to activate the oxidant. Then, the Ni³⁺ and H₂O₂ react to generate Ni²⁺ and hydroperoxyl radical (Eq 7). The hydroperoxyl radicals are converted into superoxide radicals and hydrogen ions (Eq. 8) during the catalytic oxidation. The produced hydroxyl and superoxide radicals react with the organic pollutants and the oxidation products are formed (Eqs. 9 and 10) [28,29].



The formation of hydroxyl radicals is enhanced in the presence of the colored substances presented in the textile wastewaters. In the presence of the dyestuffs visible light irradiation results in reduction of Fe³⁺ into Fe²⁺ by intermolecular

electron transfer from an excited state of dye molecule (Equations 11 and 12) [30].



The TOC removal performances of the perovskite/activated carbon catalysts at 0.25, 0.5 and 1.0 g/L catalyst loadings are presented in Figure 2. Though the catalytic performances of the nickel and iron based catalysts were close to each other, slightly higher TOC removal efficiencies were achieved in the presence of BiNiO₃/RHAC catalyst at each of the catalyst loadings.

The maximum allowable discharge limits for iron and nickel were 0.3 and 0.2 mg/L, respectively, according to the WHO guideline [31–33]. Since the difference between the allowable limits of these metals are not too high, either of the iron or nickel containing heterogeneous catalysts can be used in wastewater treatment processes. Based on the high purity chemical use and laboratory scale production, the cost of the BiNiO₃/RHAC catalyst required to treat 1 liter wastewater is 0.023\$ higher than the cost of BiFeO₃/RHAC. The catalyst cost can be decreased by using bulk chemicals at high scale production. Despite its higher cost, nickel shows high catalytic activity in pollutant removal processes and nickel-containing catalysts have the potential to be used more effectively than iron containing catalysts in the presence of various oxidants such as peroxy monosulfate [34] and air [35] in advanced oxidation processes.

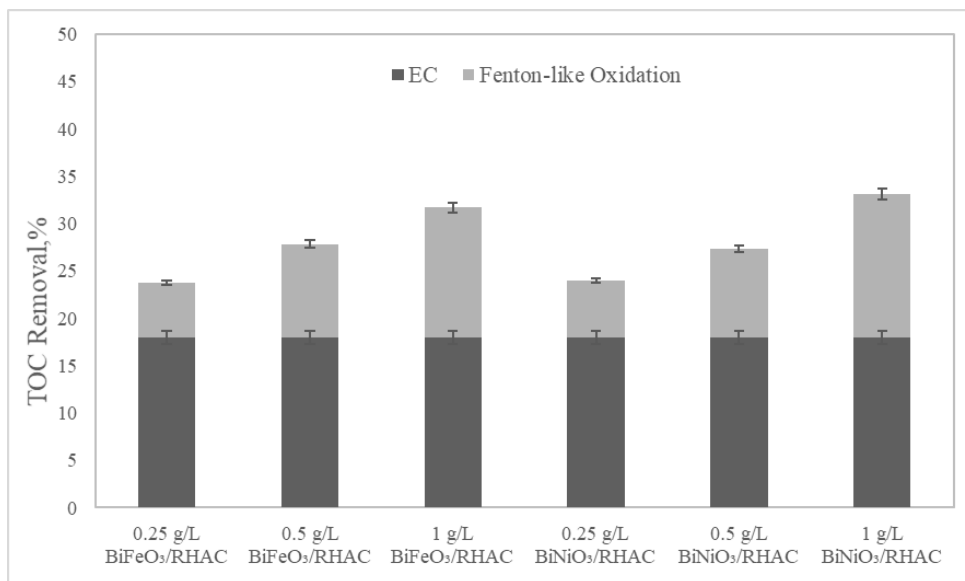


Figure 2. Comparison of catalytic performances of perovskite/activated carbon catalysts at various catalyst loadings, $[\text{TOC}]_0 = 30\text{-}32 \text{ mg/L}$, room temperature, $\text{pH}=8\text{-}8.5$. (Çeşitli katalizör yüklemelerinde perovskite/aktif karbon katalizörlerinin katalitik performanslarının karşılaştırılması, $[\text{TOC}]_0 = 30\text{-}32 \text{ mg/L}$, oda sıcaklığı, $\text{pH}=8\text{-}8,5$)

The total organic carbon removal efficiencies were improved by the increase in catalyst dosage. The enhancement in organic pollutant removal is attributed to the increase in the number of reaction sites and the increasing probability of collision between the organic molecules and catalyst particles [36].

The reactivity of metal containing composite catalysts strongly depends on the pH of the wastewater. The pH range tolerance of the perovskite/activated carbon catalysts was studied at various pH values and the results are presented in Figure 3.

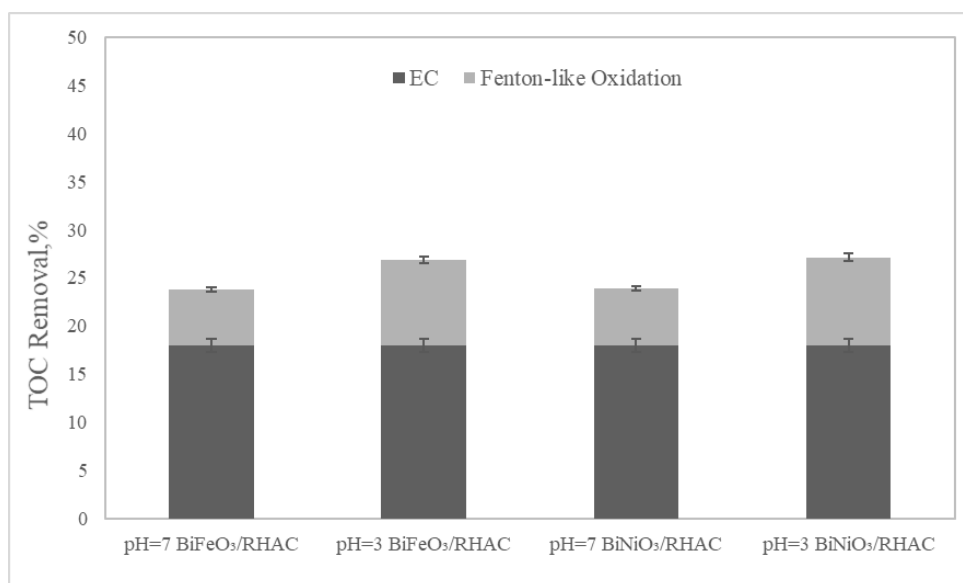


Figure 3. Comparison of catalytic performances of perovskite/activated carbon catalysts at various pH values, $[\text{TOC}]_0 = 30\text{-}32 \text{ mg/L}$, room temperature, 0.25 g/L of catalyst loading. (Perovskite/aktif karbon katalizörlerinin çeşitli pH değerlerinde katalitik performanslarının karşılaştırılması, $[\text{TOC}]_0 = 30\text{-}32 \text{ mg/L}$, oda sıcaklığı, 0,25 g/L katalizör yüklemesi)

Both of the BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts showed higher performances at pH 3. The generation of hydroxyl radicals was promoted at acidic medium since at lower pH values the perovskite catalyst surface is positively charged which enhanced the adsorption of the negatively charged molecules such as the anionic dyes present in the textile wastewater [37,38]. When the pH was 7, only a slight decrease in TOC efficiencies was observed. This trend indicated that the present system works well under acidic or neutral conditions.

According to the assessment of the catalyst screening study, BiNiO₃/RHAC and BiFeO₃/RHAC catalysts exhibited very similar catalytic performances and they were approximately equally effective in TOC removal under all of the reaction conditions tested.

Since the removal efficiencies evaluated in the presence of BiNiO₃/RHAC catalyst were slight higher, this catalyst is recommended to be used in

Fenton oxidation process subsequent to the electrocoagulation for the post-treatment of real textile wastewaters.

3.2. Investigation of the influences of the reaction parameters (Reaksiyon parametrelerinin etkilerinin incelenmesi)

In the parametric study, the effects of the catalyst loading, pH, and the initial hydrogen peroxide concentration on TOC removal were examined in the presence of BiNiO₃/RHAC catalyst which was determined as slightly more effective in pollutant removal. Various catalyst loadings varying between 0.25 and 2.0 g/L were tested to observe the impact of the catalyst amount on TOC removal. The wastewater obtained from electrocoagulation process was at neutral pH and no further pH adjustment was performed before the Fenton-like oxidation. Figure 4 depicts that the TOC removal efficiencies were increased with the increasing catalyst dosage. A similar trend was reported in the literature [39–41].

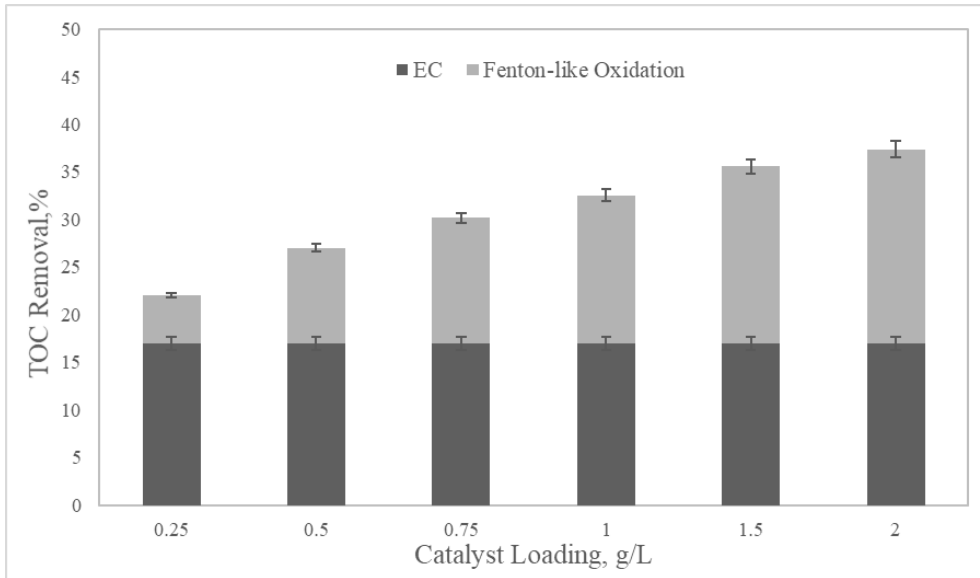
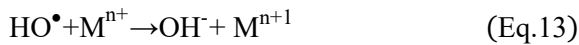


Figure 4. The effect of catalyst loading on TOC removal efficiencies, $[TOC]_0 = 30-32$ mg/L, room temperature, neutral pH) (Katalizör yüklemesinin TOK giderim verimi üzerine etkisi $[TOC]_0 = 30-32$ mg/L, oda sıcaklığı, nötr pH)

When the catalyst loading was increased from 0.25 g/L to 2 g/L, TOC removal efficiency was increased from 5% to 20.4%. The improvement of the catalytic activity could be associated to the increase in number of available active sites for pollutant adsorption and hydroxyl radical production. Though the generation of hydroxyl radicals was enhanced up to an optimum catalyst loading, the excessive amount of catalyst may result in decrease in removal efficiencies due to the self-scavenging effect of hydroxyl radicals by excess of metal ions (M^{n+}) (Eq.13) [40]:



The recommended $BiNiO_3/RHAC$ catalyst loading is 1.5 g/L for the Fenton-like oxidation of the textile wastewater since the difference in TOC removal efficiencies evaluated at 1.5 and 2 g/L of catalyst loading was below 2% and the improvement in TOC removal above 1.5 g/L dosage become insignificant gradually. Since the real industrial wastewaters exist various pH values, it is very significant to determine the effect of pH on the pollutant removal efficiency. The influence of pH was investigated in the range of 3-10 and results obtained at acidic, neutral and basic medium are shown in Figure 5.

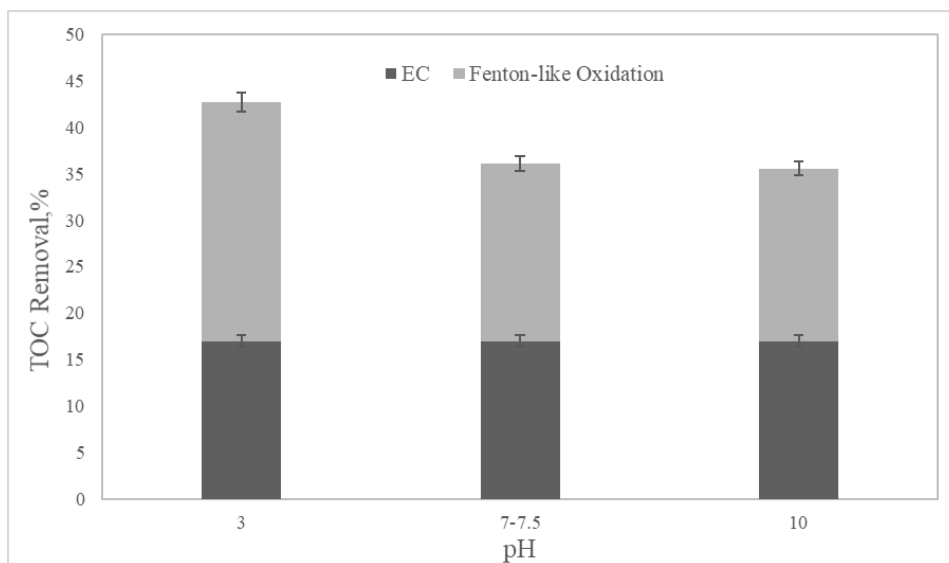


Figure 5. The effect of pH on TOC removal efficiencies, $[TOC]_0 = 30-32$ mg/L, room temperature, 1.5 g/L of catalyst loading. (pH'nin TOK giderim verimi üzerine etkisi, $[TOC]_0 = 30-32$ mg/L, oda sıcaklığı, 1,5 g/L katalizör yüklemesi)

It is well known that the Fenton reactions are favored at acidic medium. Therefore, the highest TOC removal efficiency was obtained at pH 3 whereas the post-treatment system was slightly inhibited in the alkaline solution. Under the alkaline conditions the oxidant is consumed due to the deprotonation reaction of H₂O₂ (Eq. 14) [42].



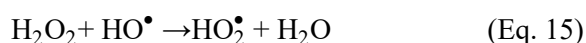
In addition, at higher pH values excessive OH⁻ ions may react with the metal ions to form metal hydroxide precipitates deposited on the catalyst surface leading to the reduction of hydroxyl radical generation.

When the wastewater pH was decreased from 10 to 3 the TOC removal efficiencies increased by 7.1%. The results obtained in this study are consistent with the literature data reported for the Fenton oxidation of various industrial pollutants [43,44].

Even though using acidic medium promoted the TOC removal, pH 7 was determined as the most suitable operating pH since it is the original pH of the electrocoagulation effluent and there is no need a further pH adjustment step to operate at neutral pH. By considering the economic and environmental aspects, neutral pH is determined to be more suitable when compared to the corrosive acidic solutions.

The oxidant dosage is another important parameter in Fenton processes. Hydroxyl radicals are the main free radicals eliminating the pollutants in the

wastewaters and H₂O₂ was used as the oxidant and the hydroxyl radical source in the present study. In order to investigate the effect of the initial H₂O₂ concentration, 2, 4 and 8 mM oxidant dosages were tested at pH 7 and 1.5 g/L catalyst loading. At 2 mM H₂O₂ concentration, 15.7% TOC removal was accomplished and approximately the same TOC removal was recorded at 4 mM H₂O₂ concentration. A further increase in oxidant dosage up to 8 mM resulted in enhancement of the TOC removal slightly. 17.7% TOC removal efficiency was evaluated when the initial H₂O₂ concentration was 8 mM. Even though using the H₂O₂ promotes the pollutant efficiency above the optimal oxidant dosages the produced hydroxyl radicals can be consumed by the scavenging effect of the excess H₂O₂ (Eq. 15) [45]:



Considering the insignificant improvement in TOC removal efficiencies and the possible scavenging effect of the high amounts of oxidant, 2 mM was selected as the most suitable H₂O₂ concentration for the Fenton-like oxidation operated in the presence of BiNiO₃/RHAC catalyst.

In addition to the TOC content, chemical oxygen demand (COD), turbidity, conductivity, pH, dissolved oxygen, and color of the textile wastewater treated under the most suitable Fenton-like oxidation conditions were determined. The wastewater characteristics determined after the subsequential application of electrocoagulation and Fenton-like oxidation were shown in Table 2.

Table 2. Treated wastewater characteristics after the application of electrocoagulation and Fenton-like oxidation (Elektrokoagülasyon ve Fenton benzeri oksidasyon uygulandıktan sonra arıtılmış atık su özellikleri)

Characteristic	Final Value	Maximum Removal (%)
TOC (mg/L)	20-25	32.7
COD (mg/L)	230-240	25.8
Turbidity (NTU)	0.30-0.40	94
Conductivity (mS/cm)	10.15	-
Salinity (ppt)	5.6	-
pH	7-7.8	-
Dissolved O ₂ (mg/L)	2.25	-
Color, m ⁻¹	436 nm	4.81-4.95
	525 nm	2.0-2.16
	620 nm	0.8-0.91

Under the most suitable electrocoagulation and Fenton-like oxidation conditions the TOC and COD removal efficiencies reached up to 32.7% and 25.8%, respectively, whereas the conductivity (or

salinity) could not be reduced by the application of the hybrid post-treatment method. The post-treatment system was very effective in turbidity and color removal.

Color limits determined in terms of European Norm EN ISO 7887 are 7 m⁻¹ for 436 nm (yellow), 5 m⁻¹ for 525 nm (red), and 3 m⁻¹ for 620 nm (blue) [46,47]. The color of the post-treated wastewater is acceptable considering the European Norm. According to the national irrigation water quality classification, pH range of 6.5–8.5 and the total suspended solids up to 30 mg/L were accepted as satisfactory for reuse as irrigation water. Therefore, the irrigation water criteria for pH and turbidity were met by the application of post-treatment. The conductivity, TOC, and COD limits were 3 mS/cm, 8 mg/L and 50 mg/L, respectively, for irrigation applications [27,48]. The TOC and COD contents and salinity (in terms of conductivity) of the post-treated wastewater are above the allowable limits set for the irrigation water. Therefore, an additional treatment method such as nanofiltration and reverse osmosis can be applied as the last step of the hybrid treatment to improve the quality of the treated wastewater, which increase the potential reuse of the wastewater. The beneficial use of water include drinking water, recreational use, fisheries and shellfish production, irrigation, and industrial process water [49]. It may be possible to reuse the treated wastewater in various fields by increasing the reuse potential of the wastewater via hybrid treatment methods.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Electrocoagulation and heterogeneous Fenton-like oxidation methods were applied sequentially for the post-treatment of real textile wastewater. The electrocoagulation was operated at 25 mA/cm² current density, pH 5 and 220 rpm agitation speed. The effluent of the electrocoagulation process was subjected to Fenton-like oxidation. BiFeO₃/RHAC and BiNiO₃/RHAC catalysts showed similar catalytic performances in the Fenton-like oxidation process. In the parametric study the influences of catalyst loading, pH, and the initial H₂O₂ concentration on total organic carbon removal were investigated. According to the results, increasing the catalyst and oxidant dosage improved the catalytic pollutant removal while decreasing the pH enhanced the removal efficiencies. Considering the environmental and economic aspects, the most suitable reaction conditions were determined as 1.5 g/L of BiNiO₃/RHAC, neutral pH, and 2 mM of H₂O₂ concentration. Under these conditions, cumulative TOC, COD, and turbidity removal efficiencies were 32.7, 25.8, and 94%, respectively. The color removal efficiencies varied between 48% and 71% for yellow, red and blue colors. The results indicated that the novel perovskite/activated carbon composite materials are promising alternatives for

the post-treatment of real industrial wastewaters in green hybrid treatment technologies.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study has been financially supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (Project Number: 315M537-ERANETMED –SETPROPER Project)./ Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından mali olarak desteklenmiştir (Proje No: 315M537-ERANETMED –SETPROPER Projesi).

We would like to thank SUN Tekstil for providing the wastewater./ SUN Tekstil'e atıksu temini için teşekkür ederiz.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Özlem BULCA: She conducted the experiments, analyzed the results and contributed to the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Burcu PALAS: She analyzed the results and contributed to the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Süheyda ATALAY: She analyzed the results and contributed to the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Gülin ERSÖZ: She analyzed the results and contributed to the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Zamora-Ledezma C, Negrete-Bolagay D, Figueroa F, Zamora-Ledezma E, Ni M, Alexis F, Guerrero VH. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environ Technol Innov.* 2021;22:101504. doi:10.1016/j.eti.2021.101504
- [2] Rafiq A, Ikram M, Ali S, Niaz F, Khan M, Khan Q, Maqbool M. Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *J Ind Eng Chem.* 2021;97:111-128. doi:10.1016/j.jiec.2021.02.017
- [3] Yoon JW, Baek MH, Hong JS, Lee CY, Suh JK. Photocatalytic degradation of azo dye using TiO₂ supported on spherical activated carbon. *Korean J Chem Eng.* 2012;29(12):1722-1729. doi:10.1007/s11814-012-0076-2
- [4] Okur M, Aktı F, Çetintaş A. Polianilin/Aljinat Kompozit Malzemesinin Asit Violet 90 Boyar Maddesinin Gideriminde Kullanılması: Kinetik Ve İzoterm Değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol.* 2018;6(4):729-740. doi:10.29109/gujsc.383614
- [5] Malakootian M, Heidari MR. Removal of phenol from steel wastewater by combined electrocoagulation with photo-Fenton. *Water Sci Technol.* 2018;78(6):1260-1267. doi:10.2166/wst.2018.376
- [6] Nidheesh P V., Zhou M, Oturan MA. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere.* 2018;197:210-227. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.12.195
- [7] Keshtkar Vanashi A, Ghasemzadeh H. Copper(II) containing chitosan hydrogel as a heterogeneous Fenton-like catalyst for production of hydroxyl radical: A quantitative study. *Int J Biol Macromol.* 2022;199(December 2021):348-357. doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.12.150
- [8] Jiang Y, Ran J, Mao K, Yang X, Zhong L, Yang C, Feng X, Zhang H. Recent progress in Fenton/Fenton-like reactions for the removal of antibiotics in aqueous environments. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2022;236(April):113464. doi:10.1016/j.ecoenv.2022.113464
- [9] Módenes AN, Espinoza-Quiñones FR, Borba FH, Manenti DR. Performance evaluation of an integrated photo-Fenton - Electrocoagulation process applied to pollutant removal from tannery effluent in batch system. *Chem Eng J.* 2012;197:1-9. doi:10.1016/j.cej.2012.05.015
- [10] Moussa DT, El-Naas MH, Nasser M, Al-Marri MJ. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *J Environ Manage.* 2017;186:24-41. doi:10.1016/j.jenvman.2016.10.032
- [11] Meas Y, Ramirez JA, Villalon MA, Chapman TW. Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochim Acta.* 2010;55(27):8165-8171. doi:10.1016/j.electacta.2010.05.018
- [12] Khandegar V, Saroha AK. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *J Environ Manage.* 2013;128:949-963. doi:10.1016/j.jenvman.2013.06.043
- [13] Hakizimana JN, Gourich B, Chafi M, Stiriba Y, Vial C, Drogui P, Naja J. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination.* 2017;404:1-21. doi:10.1016/j.desal.2016.10.011
- [14] Hernández-Francisco E, Peral J, Blanco-Jerez LM. Removal of phenolic compounds from oil refinery wastewater by electrocoagulation and Fenton/photo-Fenton processes. *J Water Process Eng.* 2017;19(July):96-100. doi:10.1016/j.jwpe.2017.07.010
- [15] Jegadeesan C, Somanathan A, Jeyakumar RB, Godvin Sharmila V. Combination of electrocoagulation with solar photo Fenton process for treatment of landfill leachate. *Environ Technol (United Kingdom).* Published online 2022:1-19. doi:10.1080/09593330.2022.2093654
- [16] Gunawan D, Kuswadi VB, Sapei L, Riadi L. Yarn dyed wastewater treatment using hybrid electrocoagulation- Fenton method in a continuous system: Technical and economical viewpoint. *Environ Eng Res.* 2018;23(1):114-119. doi:10.4491/eer.2017.108
- [17] Nidheesh P V., Scaria J, Babu DS, Kumar MS. An overview on combined electrocoagulation-degradation processes for the effective treatment of water and wastewater. *Chemosphere.* 2021;263:127907. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127907
- [18] Tejera J, Hermosilla D, Gascó A, Miranda R, Alonso V, Negro C, Blanco Á. Treatment of mature landfill leachate by electrocoagulation followed by Fenton or UVA-LED photo-Fenton processes. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2021;119:33-44. doi:10.1016/j.jtice.2021.02.018
- [19] Yazdanbakhsh M, Tavakkoli H, Hosseini SM. Characterization and evaluation catalytic efficiency of La_{0.5}Ca_{0.5}NiO₃ nanopowders in removal of reactive blue 5 from aqueous solution. *Desalination.* 2011;281(1):388-395. doi:10.1016/j.desal.2011.08.020

- [20] Farhadi ARK, Rahemi N, Allahyari S, Tasbihi M. Metal-doped perovskite BiFeO₃/rGO nanocomposites towards the degradation of acetaminophen in aqueous phase using plasma-photocatalytic hybrid technology. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2021;120:77-92. doi:10.1016/j.jtice.2021.03.021
- [21] Bener S, Atalay S, Ersöz G. The hybrid process with eco-friendly materials for the treatment of the real textile industry wastewater. *Ecol Eng.* 2020;148(December 2019). doi:10.1016/j.ecoleng.2020.105789
- [22] Zazou H, Afanga H, Akhouairi S, Ouchtak H, Addi AA, Akbour RA, Assabbane A, Douch J, Elmchaouri A, Duplay J, Jada A, Hamdani M. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *J Water Process Eng.* 2019;28(December 2018):214-221. doi:10.1016/j.jwpe.2019.02.006
- [23] Tanveer R, Yasar A, Tabinda A ul B, Ikhlaiq A, Nissar H, Nizami AS. Comparison of ozonation, Fenton, and photo-Fenton processes for the treatment of textile dye-bath effluents integrated with electrocoagulation. *J Water Process Eng.* 2022;46(October 2021):102547. doi:10.1016/j.jwpe.2021.102547
- [24] Bulca Ö, Palas B, Atalay S, Ersöz G. Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling. *J Water Process Eng.* 2021;40(December 2020). doi:10.1016/j.jwpe.2020.101821
- [25] Ghanbari F, Wu J, Khatebasreh M, Ding D, Lin KYA. Efficient treatment for landfill leachate through sequential electrocoagulation, electrooxidation and PMS/UV/CuFe₂O₄ process. *Sep Purif Technol.* 2020;242(December 2019). doi:10.1016/j.seppur.2020.116828
- [26] Bener S, Bulca Ö, Palas B, Tekin G, Atalay S, Ersöz G. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Saf Environ Prot.* 2019;129:47-54. doi:10.1016/j.psep.2019.06.010
- [27] Bayrakdar M, Atalay S, Ersöz G. Efficient treatment for textile wastewater through sequential photo Fenton-like oxidation and adsorption processes for reuse in irrigation. *Ceram Int.* 2021;47(7):9679-9690. doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.107
- [28] Hu L, Zhang G, Liu M, Wang Q, Dong S, Wang P. Application of nickel foam-supported Co₃O₄-Bi₂O₃ as a heterogeneous catalyst for BPA removal by peroxydisulfate activation. *Sci Total Environ.* 2019;647:352-361. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.003
- [29] Wang L, Liu Y, Lin Y, Yu Y, Zhang X, Zhang R, Zhai Y. One-step synthesis of novel Ni-doped Cu₂(OH)₃F Fenton-like catalyst driven by visible light: Single activity and synergistic effect enhanced by bimetallic cooperation. *J Alloys Compd.* 2021;887:161424. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161424
- [30] Bokare AD, Choi W. Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes. *J Hazard Mater.* 2014;275:121-135. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.04.054
- [31] Aniyikaiye TE, Oluseyi T, Odiyo JO, Edokpayi JN. Physico-chemical analysis of wastewater discharge from selected paint industries in Lagos, Nigeria. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(7). doi:10.3390/ijerph16071235
- [32] Bakare BF, Adeyinka GC. Evaluating the Potential Health Risks of Selected Heavy Metals across Four Wastewater Treatment Water Works in Durban, South Africa. *Toxics.* 2022;10(6):1-17. doi:10.3390/toxics10060340
- [33] Ma J, Wu S, Shekhar NVR, Biswas S, Sahu AK. Determination of Physicochemical Parameters and Levels of Heavy Metals in Food Waste Water with Environmental Effects. *Bioinorg Chem Appl.* 2020;2020. doi:10.1155/2020/8886093
- [34] Lin KYA, Chen YC, Lin YF. LaMO₃ perovskites (M=Co, Cu, Fe and Ni) as heterogeneous catalysts for activating peroxydisulfate in water. *Chem Eng Sci.* 2017;160(November 2016):96-105. doi:10.1016/j.ces.2016.11.017
- [35] Ovejero G, Rodríguez A, Vallet A, Gómez P, García J. Catalytic wet air oxidation with Ni- and Fe-doped mixed oxides derived from hydrotalcites. *Water Sci Technol.* 2011;63(10):2381-2387. doi:10.2166/wst.2011.513
- [36] Arghavan FS, Al-Musawi TJ, Rumman GA, Pelalak R, Khataee A, Nasseh N. Photocatalytic performance of a nickel ferrite/chitosan/bismuth(III) oxyiodide nanocomposite for metronidazole degradation under simulated sunlight illumination. *J Environ Chem Eng.* 2021;9(4):105619. doi:10.1016/j.jece.2021.105619
- [37] Palas B, Ersöz G, Atalay S. Fenton-like oxidation of reactive Black 5 in the presence of LaBO₃ (b: Fe, Co, Mn, Ni) perovskite catalysts.

- J Turkish Chem Soc Sect A Chem.* 2017;5(sp.is.1):37-44.
doi:10.18596/jotcsa.370758
- [38] Miao J, Duan X, Li J, Dai J, Liu B, Wang S, Zhou W, Shao Z. Boosting performance of lanthanide magnetism perovskite for advanced oxidation through lattice doping with catalytically inert element. *Chem Eng J.* 2019;355(5):721-730.
doi:10.1016/j.cej.2018.08.192
- [39] Jain A, Pal SL, Jaiswal Y, Srivastava S. Designing a Feasible Phenol Destruction Process Using $\text{LaM}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ (M = Co, Cr, Fe) Perovskites as Heterogeneous Fenton-Like Catalysts. *Arab J Sci Eng.* 2021;3(0123456789). doi:10.1007/s13369-021-05655-y
- [40] Hammouda S Ben, Zhao F, Safaei Z, Babu I, Ramasamy DL, Sillanpää M. Reactivity of novel Ceria-Perovskite composites $\text{CeO}_2\text{-LaMO}_3$ (MCu, Fe) in the catalytic wet peroxidative oxidation of the new emergent pollutant 'Bisphenol F': Characterization, kinetic and mechanism studies. *Appl Catal B Environ.* 2017;218:119-136.
doi:10.1016/j.apcatb.2017.06.047
- [41] Nie Y, Zhang L, Li YY, Hu C. Enhanced Fenton-like degradation of refractory organic compounds by surface complex formation of LaFeO_3 and H_2O_2 . *J Hazard Mater.* 2015;294:195-200.
doi:10.1016/j.jhazmat.2015.03.065
- [42] Wu Z, Gu Y ying, Xin S, Lu L, Huang Z, Li M, Cui Y, Fu R, Wang S. $\text{Cu}_x\text{Ni}_y\text{Co-LDH}$ nanosheets on graphene oxide: An efficient and stable Fenton-like catalyst for dual-mechanism degradation of tetracycline. *Chem Eng J.* 2022;434(January).
doi:10.1016/j.cej.2022.134574
- [43] Manenti DR, Módenes AN, Soares PA, Espinoza-Quiñones FR, Boaventura RAR, Bergamasco R, Vilar VJP. Assessment of a multistage system based on electrocoagulation, solar photo-Fenton and biological oxidation processes for real textile wastewater treatment. *Chem Eng J.* 2014;252:120-130.
doi:10.1016/j.cej.2014.04.096
- [44] Sreeja PH, Sosamony KJ. A Comparative Study of Homogeneous and Heterogeneous Photo-fenton Process for Textile Wastewater Treatment. *Procedia Technol.* 2016;24:217-223. doi:10.1016/j.protcy.2016.05.065
- [45] Li S, Zhang G, Zheng H, Zheng Y, Wang P. Application of BiFeO_3 -based on nickel foam composites with a highly efficient catalytic activity and easily recyclable in Fenton-like process under microwave irradiation. *J Power Sources.* 2018;386(March):21-27.
doi:10.1016/j.jpowsour.2018.03.027
- [46] Libra JA, Sosath F. Combination of biological and chemical processes for the treatment of textile wastewater containing reactive dyes. *J Chem Technol Biotechnol.* 2003;78(11):1149-1156. doi:10.1002/jctb.904
- [47] Çiner F, Gökkuş Ö. Treatability of dye solutions containing disperse dyes by fenton and fenton-solar light oxidation processes. *Clean - Soil, Air, Water.* 2013;41(1):80-85. doi:10.1002/clen.201000500
- [48] Arslan-Alaton I, Tanik A, Ovez S, Iskender G, Gurel M, Orhon D. Reuse potential of urban wastewater treatment plant effluents in Turkey: a case study on selected plants. *Desalination.* 2007;215(1-3):159-165.
doi:10.1016/j.desal.2006.11.019
- [49] Gürel M, Pehlivanoglu-Mantas E. Water Quality Requirements. In: Krantzber G, ed. *Advances in Water Quality Control.* Scientific Research Publishing; 2010.

Strain Dependent Electronic Properties of Hexagonal Monolayer Boron Phosphide with GPAW using GLLB-SC and PBE

Polat NARİN^{1*} 

¹AYBU Central Research Laboratory, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara 06050, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 13/09/2022
Revision: 26/12/2022
Accepted: 27/12/2022

Keywords

DFT
Hexagonal Boron
Phosphide
2D materials
GLLB-SC
PBE

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/09/2022
Düzeltilme: 26/12/2022
Kabul: 27/12/2022

Anahtar Kelimeler

YFT
Hekzagonal Bor
Fosfat
2B malzemeler
GLLB-SC
PBE

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the strain-dependent electronic properties of monolayer h-BP are studied by DFT method using GPAW. Applying strain to h-BP monolayer shows the tunable electronic band gap. / Bu çalışmada, gerginliğe bağlı hekzagonal bor fosfat tek tabakanın elektronik özellikleri GPAW kullanılarak YFT yöntemiyle çalışılmıştır. h-BP'a uygulanan gerginlik ile ayarlanabilir elektronik bant aralığı elde edilmiştir.

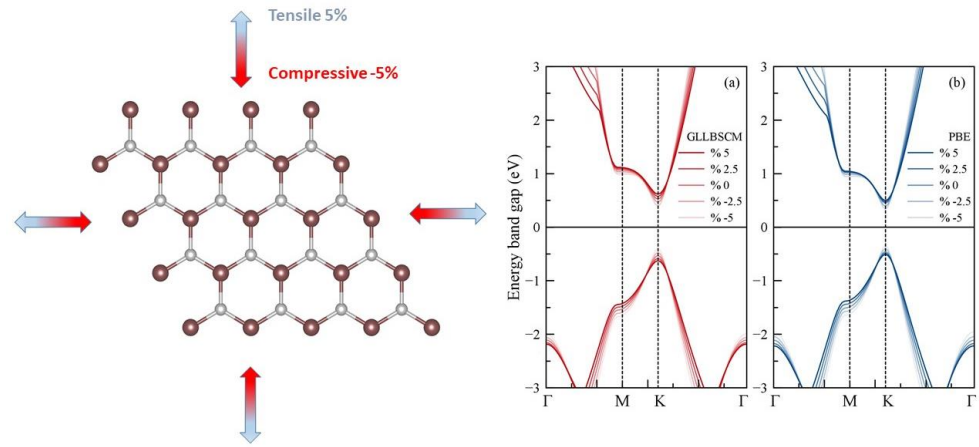


Figure A: Applying strain and electronic band structures of h-BP monolayer / Şekil A: Uygulanan gerginlik ve h-BP tek tabakanın elektronik bant yapıları.

Highlights (Önemli noktalar)

- The strain dependent electronic properties of h-BP monolayer have been investigated. / Gerginlik bağlı h-BP tek tabakanın elektronik özellikleri incelenmiştir.
- GLLB-SC is more accurately calculated the electronic band structure of h-BP monolayer than PBE. / GLLB-SC h-BP tek tabakanın elektronik bant yapısının PBE'den daha doğru hesaplamaktadır.
- h-BP monolayer has been shown a tunable band gap with strain. / h-BP gerginlik ile ayarlanabilir bant aralığı göstermiştir.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to calculate the electronic band structure of h-BP using GPAW. Also it is aimed to calculate the strain-dependent electronic band structure of h-BP monolayer using GLLB-SC and PBE. / Bu çalışmada h-BP tek tabakanın elektronik bant yapısını GPAW kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır. Ayrıca gerginliğe bağlı olarak h-BP tek tabakanın elektronik özellikleri GLLB-SC ve PBE kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): The strain-dependent electronic properties of h-BP using GPAW have been investigated for the first time. / Gerginliğe bağlı h-BP tek tabakanın elektronik özellikleri GPAW kullanılarak ilk kez incelenmiştir.

Results (Bulgular): The electronic properties of h-BP monolayer have been investigated. The found electronic band gap values have been compared with the literature's results. It is found that GLLB-SC has more accurately calculated the electronic band structure than PBE. / h-BP tek tabakanın elektronik özellikleri incelenmiştir. GLLB-SC, h-BP'in elektronik bant yapısını PBE'den daha doğru hesapladığı bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): This study shows the results of the electronic band structure of h-BP under strain using GPAW. As result of this study, applying strain to h-BP is to change the electronic band structure. / Bu çalışma GPAW kullanılarak gerginlik altında h-BP'in elektronik bant yapısının sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu olarak, h-BP tek tabakaya gerginlik uygulamak elektronik bant yapısını değiştirmektedir.



Strain Dependent Electronic Properties of Hexagonal Monolayer Boron Phosphide with GPAW using GLLB-SC and PBE

Polat NARİN^{1*}

¹AYBU Central Research Laboratory, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara 06050, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 13/09/2022

Revision: 26/12/2022

Accepted: 27/12/2022

Keywords

DFT

Hexagonal Boron

Phosphide

2D materials

GLLB-SC

PBE

Abstract

Two dimensional materials (2D) like Graphene have a big importance due to their unique electronic properties. In numerical calculations, the electronic properties of 2D materials have been studied using *ab initio* methods. For this reason, in this study, the electronic properties of the hexagonal Boron Phosphide (h-BP) monolayer have been investigated by first-principles calculations. The electronic band structure of the h-BP monolayer has been calculated using GPAW with PBE and GLLB-SC exchange correlations (XCs). In this study, GLLB-SC has been used to investigate the electronic properties of h-BP for the first time. The energy band gaps of the h-BP monolayer are found to be 0.89 eV and 1.05 eV for PBE and GLLB-SC, respectively. It is shown that GLLB-SC in calculations as XC ensures a more accurate energy band gap than the PBE. As well as the electronic calculations of the unstrained h-BP monolayer, the strain calculations are performed between +5 and -5 %. The strain in the h-BP monolayer changed the energy band gap between 0.78 eV and 1.24 eV for GLLB-SC and between 0.66 eV and 1 eV for PBE. In this applied strain range the studied structure shows the direct band gap semiconductor behavior. Furthermore, strain-dependent tunable energy band gap has been obtained as a result of the calculations.

GLLB-SC ve PBE kullanılarak GPAW ile Hekzagonal Tek Tabakalı Bor Fosfatın Gerginliğe Bağlı Elektronik Özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 13/09/2022

Düzeltilme: 26/12/2022

Kabul: 27/12/2022

Anahtar Kelimeler

YFT

Hekzagonal Bor

Fosfat

2B malzemeler

GLLB-SC

PBE

Öz

Grafen benzeri iki boyutlu malzemeler (2B) eşsiz özellikleri sebebiyle büyük bir öneme sahiptir. Hesaplamalı çalışmalarda, 2B malzemelerin elektronik özellikleri *ab initio* metodları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sebeple, bu çalışmada, hekzagonal Bor Fosfat (h-BP) tek tabakanın elektronik özellikleri ilk prensipler ile hesaplanmıştır. H-BP tek tabakanın elektronik özellikleri GPAW ile PBE ve GLLB-SC değiş tokuş korelasyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, h-BP tek tabakanın elektronik özelliklerini incelemek için ilk kez GLLB-SC kullanılmıştır. H-tek tabaka için yasak bant aralığı değerleri sırasıyla PBE ve GLLB-SC için 0.89 eV ve 1.05 eV olarak hesaplanmıştır. Değiş tokuş korelasyonu olarak GLLB-SC yönteminin, PBE'den daha doğru sonuç verdiği görülmektedir. Gerginlik olmadığı durumda h-BP tek tabakanın elektronik hesaplarının yanı sıra, +5% ve -5% aralığında gerginliğe sahip örgü için elektronik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. H-BP tek tabaka'daki gerginlik GLLB-SC yöntemi ile hesaplandığında yasak bant aralığını 0.78 eV ve 1.24 eV aralığında, PBE yöntemi için ise 0.66 eV ve 1 eV aralığında değiştirmiştir. Uygulanan gerginlik aralığında, h-BP direk geçişli yarıiletken davranışı sergilemiştir. Bunlara ek olarak hesaplamaların sonucunda h-BP'da gerginliğe bağlı olarak ayarlanabilir yasak bant aralığı elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Two-dimensional (2D) materials have been attracted over the past years. Since 2D materials have been studied electronic-based applications such as field effect transistors, high-frequency electronics, 2D flexible electronic applications etc.[1] Among these applications, some of these are

Li/Na-ion batteries of graphene and sub-10 nm transistors of MoS₂ [2]. These examples give a fingerprint about the importance of 2D because it is required a few layer thicknesses of 2D materials to build nanometer-scale devices. In flexible sensor applications, the flexible and ultrathin piezoelectrics properties of 2D layered materials like MoS₂ are used [3]. Moreover, the lack of

inversion symmetry in InSe, GaS monolayers produces high large in-plane piezoelectric properties [4]. These above unique properties of 2D materials are still being studied. Transition-metal di-chalcogenides (TMDs), buckled and puckered 2D materials such as silicene, germanene, phosphorene, etc. are recent 2D material groups [5-8]. Similar to these materials, III-V group monolayers including hexagonal crystal systems are another planar important 2D materials [9]. Well-known hexagonal boron nitride (h-BN) is one of the III-V monolayers that has a wide band gap energy of ~6 eV. Similar to the hexagonal honeycomb crystal structure of h-BN, hexagonal boron phosphide (h-BP monolayer) has attracted over the last years due to direct semiconductor behavior, energetically stability, small effective mass, and high carrier mobility [10-12].

The energy band gap of the h-BP monolayer is nearly 0.8 eV for PBE in density functional theory (DFT) calculations [13]. Some studies calculated by different exchange-correlation (XC) energy functionals such as hybrid HSE06 and GW a show higher energy band gap than PBE results [14, 15]. In recent years, fast XC functionals such as meta-GGA, modified Becke-Johnson (mBJ), *etc.* are used to reduce the computational expensiveness compared to hybrid HSE06 and GW [16]. Another importance of these types of XC functionals is lower absolute relative errors (15%-40%) than PBE (50%) [17]. However, this absolute relative error is strongly dependent on chosen materials type [18]. As well as HSE06 and GW, GLLB-SC XC functional purposed by Gritsenko, van Leeuwen, van Lenthe, and Baerends (GLLB) and for solids and correlation (SC) called as GLLB-SC are calculated similarly to HSE06's results [19]. Also, GLLB-SC is implemented in GPAW code and used for DFT calculations [20]. GLLB-SC is known to give similar lower absolute relative error just as mBJ and meta-GGA.

The electronic behavior of the h-BP monolayer could be tunable with the external electric field, strain in the lattice, doping, *etc.* [13, 21, 22]. Among these, the strain is usually used to control the bandgap for many 2D materials [23]. In PBE and HSE06 calculations of the h-BP monolayer showed that as long as from compressive (blue shift) to tensile (redshift) strain on the lattice is applied, the electronic band gap is increased [24]. However, these calculations are not yet investigated by GLLB-SC. Therefore, in this study, the strain-dependent calculations between -5% and +5% of h-BP monolayer have been investigated to determine electronic structure with PBE and GLLB-SC.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Computational Details (Hesaplama Detayları)

First principle calculations have been performed using a grid-based projector-augment wave (GPAW) code-[25]. To reduce the complexity in preparing input, *gpaw-tools* written by Lisesivdin *et. al.* are used [26]. The *gpaw-tools* are very useful at each step of the input preparation and result processing. Before the electronic structure calculations of h-BP, some optimizations have been made. For optimizations, the lattice as shown in figure 1 which has illustrated the configuration of the planar h-BP monolayer and also observed unit-cell with a black line has been used. The k-points and cut-off values are used 9x9x1 and 450 eV both PBE and GLLB-SC functionals, respectively. GLLB-SC is not allowed geometry optimization; hence, both XCs have performed optimizations. The lattice optimization calculations were done for both PBE and GLLB-SC XCs.

Figure 2 shows the energy dependence of the lattice parameters of h-BP. The calculated energy-dependent lattice parameters for both are fitted and found to be 3.2074 Å for PBE and 3.2068 Å for GLLB-SC for minimum total energy values. Along the z-axis, c the parameter is kept as 20 Å to avoid interaction between planes. After optimizations of k-point, cut-off, and the lattice parameters of h-BP, the electronic band structure, density of states (DOS), and projected DOS (PDOS) of the h-BP monolayer have been calculated unstrained by both PBE and GLLB-SC. To investigate the effect of strain on the electronic results of h-BP, the strain values between -5% and +5% are applied with changing lattice parameters eq.(1). The electronic band structures and the energy band gaps are calculated depending on the strain in the lattice. Using these unstrained lattice parameters of the h-BP, the strained lattice parameters are calculated in the following equation;

$$\varepsilon = (a - a_0)/a_0 \quad (1)$$

Where ε is the strain, a_0 and a are unstrained and strained lattice parameters of the h-BP, respectively. Also, due to $a=b$ of h-BP, the strain equation is only given for a parameter. However, in calculations, the biaxial strain is applied to both lattice parameters of h-BP.

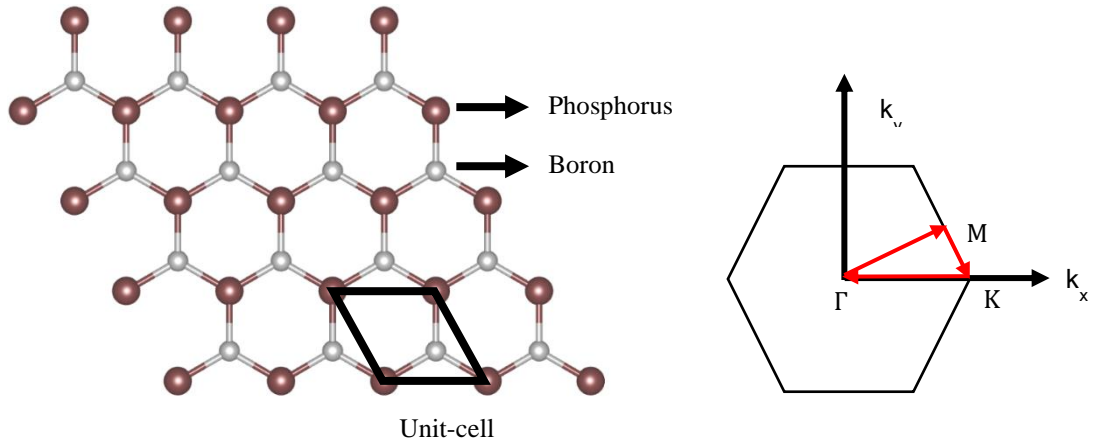


Figure 1. In left side the atomic configuration of h-BP monolayer and in right side schematic Brillouin zone for h-BP which uses in planar hexagonal lattice the used brillioun path also shown with red arrows Γ -M-K- Γ . The used unit cell of h-BP is shown as black line. In atomic configuration of h-BP brown and gray spheres represent Phosphorus and Boron atoms, respectively (Sol tarafta h-BP'in atomik konfigürasyonu, sağ tarafta düzlem hekzagonal örgüyü kullanan şematik Brillouin bölge ve kullanılan brillioun yol Γ -M-K- Γ kırmızı oklar ile gösterilmektedir. H-BP'in atomik konfigürasyonunda kahve ve gri küreler sırasıyla fosfor ve Bor atomlarını temsil etmektedir)

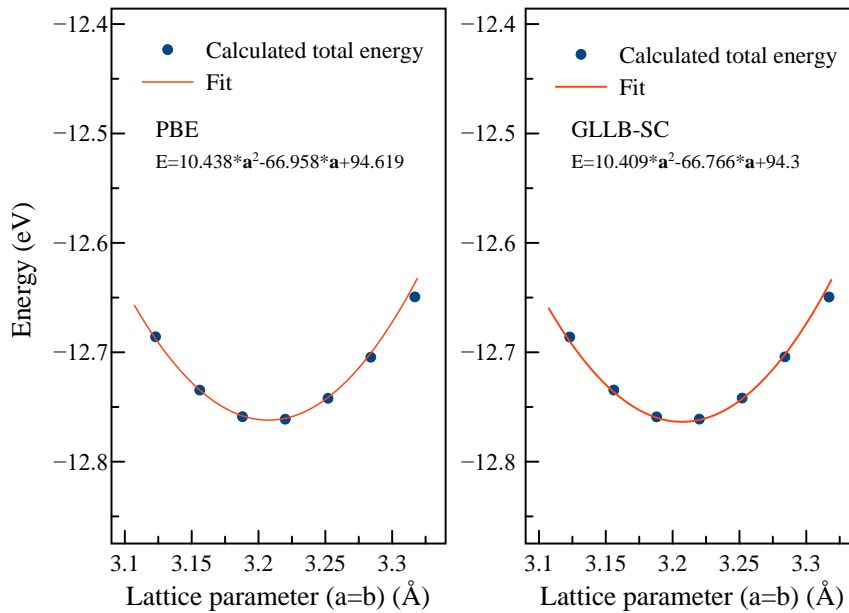


Figure 2. After lattice parameter optimizations, change of lattice parameter depends on total energy for PBE and GLLB-SC as XC's. Energy dependent lattice parameters have been found the optimized lattice parameters using fit plot both PBE and GLLB-SC functionalims (Örgü parametre optimizasyonundan sonra, PBE ve GLLB-SC değiş tokuş korelasyonları için toplam enerjiye bağlı olarak örgü parametresinin değişimi)

3. RESULTS (BULGULAR)

Figure 3 shows the electronic band structure and DOS result for unstrained the h-BP monolayer. The energy band gap values for PBE and GLLB-SC are calculated as 0.89 eV and 1.05 eV with a direct band gap at K point, respectively. In literature, the energy band gap of the h-BP monolayer for PBE is consistent with other studies [27]. The calculated energy band gap for GLLB-SC is slightly lower than

HSE06 and GW results [28-30]. However, it gives a more accurate value than standard PBE calculations. It can be said that a more accurate energy band gap as a result of GLLB-SC is obtained with low computing cost according to PBE.

Moreover, the contribution of the orbitals of Boron (B) and Phosphorus (P) is calculated by PDOS calculations and shown in figure 4. The valence band (VB) of h-BP is mostly formed by the p

orbitals of B and P atoms. The p orbital of P atoms has much more contribution than the B atom. However, the more contribution to the conduction band (CB) came from the p orbitals of the B atom. Also, the s orbitals of both atoms have a low density for the VB and CB. For calculated bond lengths (d_B .

ρ) between B and P atoms is given 1.8540 Å for PBE and 1.8516 Å for GLLB-SC, respectively. The bond lengths of h-BP are coherent with found values in the literature [28, 29].

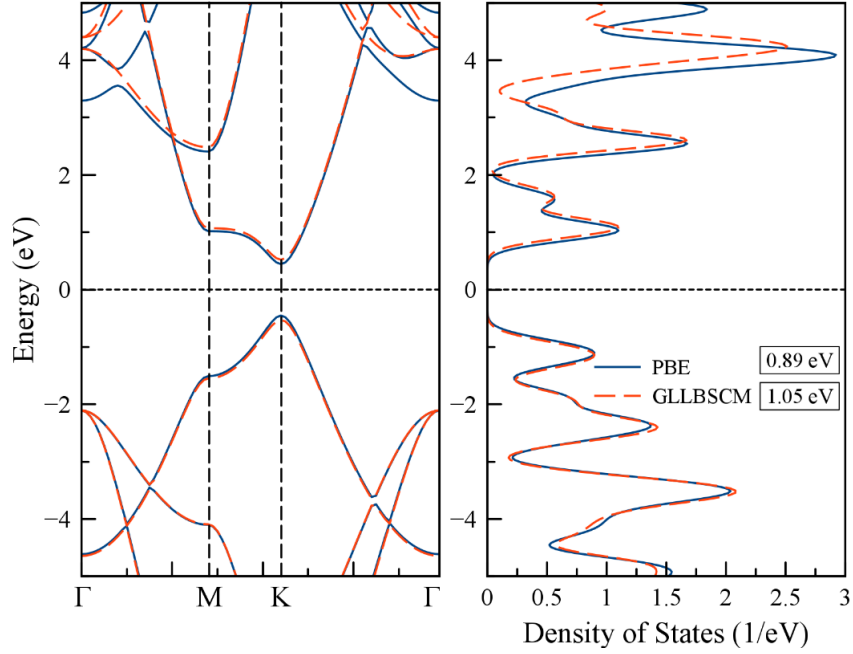


Figure 3. Electronic band structure and DOS of the h-BP monolayer using GLLB-SC and PBE as XCs (Değiş-tokuş korelasyonu olarak GLLB-SC ve PBE kullanılarak h-BP tek tabakanın elektronik band yapısı ve durum yoğunluğu)

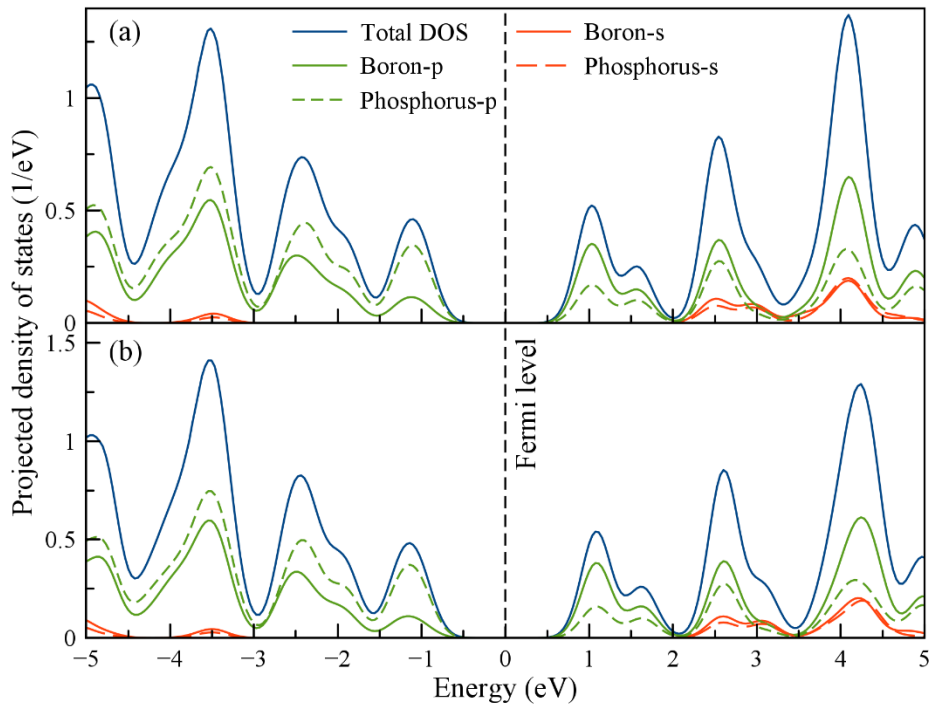


Figure 4. PDOS of the h-BP for a) PBE and b) GLLB-SC (a) PBE ve b) GLLB-SC için h-BP'nin PDOS sonuçları)

After the strain is applied to the h-BP monolayer, the bond length of h-BP for PBE and GLLB-SC are calculated to fit equations are given as $d_{B-P}^{PBE} =$

$1.8523 + 0.0185x$ for PBE and $d_{B-P}^{GLLB-SC} = 1.8515 + 0.0185x$ for GLLB-SC also in here x represents strain. From the fit equations for both

XC's, as the strain is applied on the structure from compressive to tensile step by step, the bond lengths of h-BP are changed almost linearly. As strain is changed from -5% to 5%, the energy band gap values for PBE are changed from 0.667 eV to 1.005 eV in figure 5a. As for energy band gap values of GLLB-SC, the energy band gaps are found at 0.784 eV and 1.241 eV for -5% and 5% in figure 5b. Also, a fit is applied to the energy band gap result of PBE and GLLB-SC. The fit equations are found to be $E_g^{PBE} = 0.8821 + 0.0337x - 0.0019x^2$ for PBE and $E_g^{GLLB-SC} = 1.0539 + 0.0456x - 0.0017x^2$ for GLLB-SC. All calculated energy band gaps show a blue shift for compressive strain and a red shift for tensile strain. The energy band gap changing (ΔE) for PBE and GLLB-SC is found to be 0.338 eV and 0.457 eV, respectively. It is shown that GLLB-SC to adjust the energy band gap with a larger range is given as better results. In literature, a study done by HSE06 is shown 0.456 eV for ΔE value the with same strain range in our study [30]. It is important that although obtained energy band

gaps by GLLB-SC are slightly lower than HSE06, the capability of the tuning energy band gap for these XC's is almost the same. The strain-dependent electronic band structure for both PBE and GLLB-SC show a direct transition-energy band gap at K for the strained and unstrained structure of h-BP.

Strain could affect the energetical stability of the h-BP monolayer, and the total energy values per atom calculated by PBE and GLLB-SC are by table 1. The unstrained h-BP monolayers show more stability for PBE and GLLB-SC. Applying strain to the h-BP monolayer lattice, h-BP has become an energetically unstable structure.

A comparison of both this study and other studies in the literature on energy band gap changing is shown in figure 6. The applied strain values to the h-BP are between $\pm 5\%$. Our results for PBE are very consistent with other results in the literature [24, 33, 34].

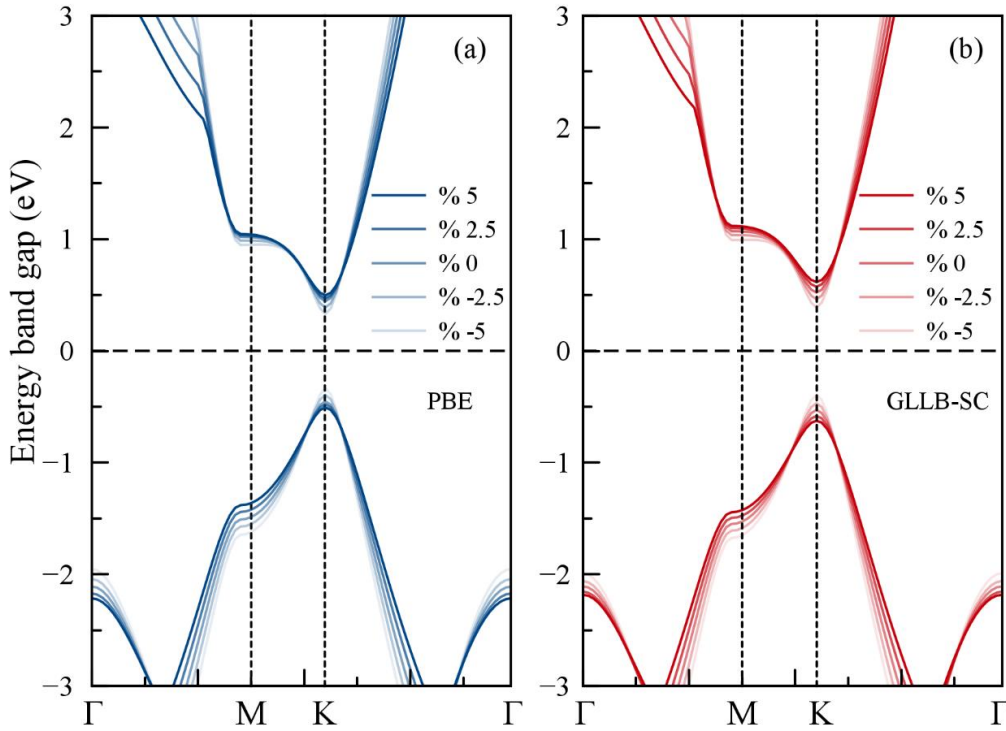


Figure 5. CBM and VBM change depending on strain in the h-BP monolayer using a) PBE and b) GLLB-SC. The applied strain to h-BP is between -5% and 5% for PBE and GLLB-SC functionalims (h-BP tek tabakasında gerginliğe bağlı olarak CBM ve VBM değişimi a) PBE ve b) GLLB-SC. H-BP tek tabakasına uygulanan gerginlik PBE ve GLLB-SC fonksiyonelizmler için -5% ve 5% arasındadır)

Table 1. Summarized the structural and the electronic calculations, the effect of strain on the bond lengths and total energies of the h-BP monolayer. The results are shown both PBE and GLLB-SC functionalism. Both functionalism show that the structural stability according to total energies is decreased under strain (yapısal ve elektronik hesaplamaların özeti, gerginliğin h-BP tek tabakanın bağ uzunluğu ve toplam enerjisine etkisi. Hem PBE hem de GLLB-SC sonuçları görülmektedir. Her iki fonksiyon gerginlik altında toplam enerjiye göre stabilite azalmaktadır.)

Strain (%)	d_{P-B} (Å) with PBE	d_{P-B} (Å) with GLLB-SC	Total energy (eV) per atom with PBE	Total energy (eV) per atom with GLLB-SC
-5	1.7592	1.7589	-5.9581	-6.2654
-2.5	1.8056	1.8052	-6.0343	-6.3491
0	1.8540	1.8515	-6.0591	-6.3785
2.5	1.8981	1.8978	-6.0128	-6.3416
5	1.9444	1.9441	-5.8876	-6.2230

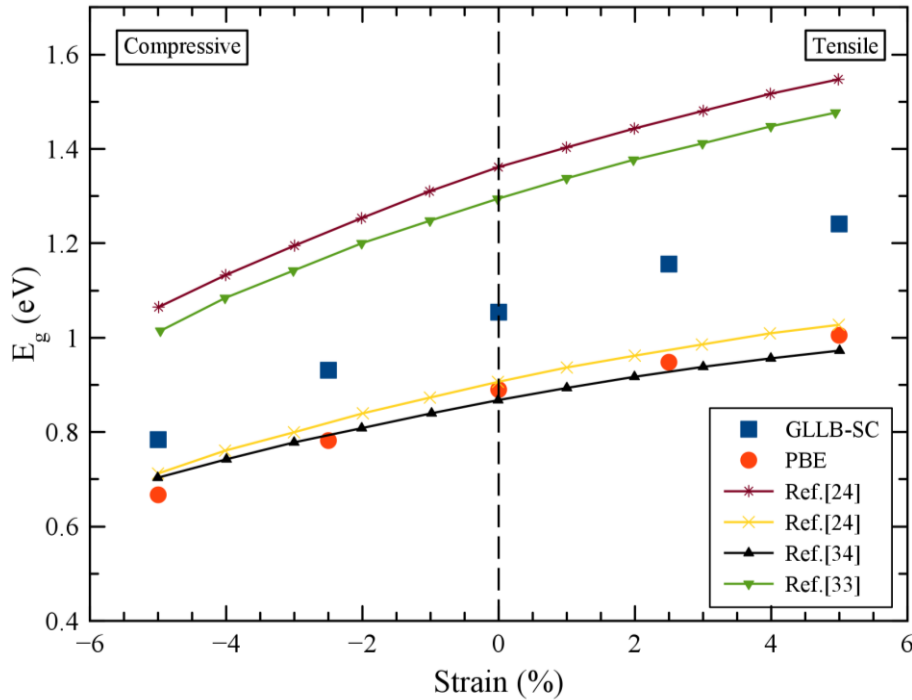


Figure 6. Change in energy band gap dependent on applied strain to h-BP and comparison other studies found in the literature (Literatürde bulunan diğer çalışmaların kıyaslaması ve gerginlik uygulanmış h-BP tek tabakanın yasak bant aralığındaki değişim)

In literature, energy band gaps of h-BP depending on $\pm 5\%$ of the strain are changed from ~ 0.7 to ~ 1 eV for PBE functionalism. As for GLLB-SC calculations, it is lower than a little bit HSE06 results of other studies [24]. Furthermore, energy

band gaps of h-BP in same strain values for HSE06 given similar data to experimental results are found between ~ 1 and ~ 1.5 eV. Due to the lack of the experimental band gap for the h-BP monolayer, the exact band gap of the h-BP cannot be determined up

to now. However, according to our best knowledge, for many 2D materials, the calculated energy band gap results with GLLB-SC include comparable with HSE06 and GW results found in the literature [17, 35]. Also, the investigated strain range of the h-BP, and the increasing trend in the energy band gap for PBE and GLLB-SC in this work are very similar to each.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The electronic structure of pristine monolayer h-BP is investigated by DFT using the GPAW code implemented in PBE and GLLB-SC as exchange-correlation functionals. For the input parameter interpretation, and result data management, gpaw-tools software is used. The energy band gaps of the monolayer are 0.89 eV and 1.05 eV for PBE and GLLB-SC, respectively. The GLLB-SC which has a low computational cost to HSE06 and GW shows a more accurate electronic structure than PBE for monolayer h-BP. To see the electronic structure behavior of the h-BP against applied strain, electronic band structures are calculated for both tensile and compressive strain regions. As the strain values apply to lattice from -5% to 5%, the calculated energy band gaps have gradually increased. The strained electronic band structures are found to be direct semiconductor properties between the investigated strain values. The obtained strain-dependent electronic and structural properties may be important for the possibility in flexible technology of h-BP monolayers.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

I would like to thank Prof. Dr. S. B. Lisesivdin and Prof. Dr. B. Sarikavak-Lisesivdin from the Physics department at Gazi University for the continuous development of *gpaw-tools* script.

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)

Polat NARİN: He carried out the numerical calculations, analyzed the results and performed the writing process.

Nümerik hesaplamaları gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti 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] Fiori, G., Bonaccorso, F., Iannaccone, G., Palacios, T., Neumaier, D., Seabaugh, A., Banerjee, S. K., Colombo, L. (2014). Electronics based on two-dimensional materials. *Nature nanotechnology*, 9(10), 768-779.
- [2] Xu, B., Qi, S., Jin, M., Cai, X., Lai, L., Sun, Z., Han, X., Lin, Z., Shao, H., Peng, P., Xiang, Z., Elshof, J. E., Tan, R., Liu, C., Zhang, Z., Duan, X. & Ma, J. (2019). 2020 roadmap on two-dimensional materials for energy storage and conversion. *Chinese Chemical Letters*, 30(12), 2053-2064.
- [3] Cheng, L., Lee, J., Zhu, H., Ravichandran, A. V., Wang, Q., Lucero, A. T., Kim, M. J., Wallace, R. M. Colombo, L. & Kim, J. (2017). Sub-10 nm tunable hybrid dielectric engineering on MoS₂ for two-dimensional material-based devices. *ACS nano*, 11(10), 10243-10252.
- [4] Dai, M., Wang, Z., Wang, F., Qiu, Y., Zhang, J., Xu, C. Y., Zhai, T., Cao, W., Fu, Y., Jia, D., Zhou, Y., & Hu, P. A. (2019). Two-dimensional van der Waals materials with aligned in-plane polarization and large piezoelectric effect for self-powered piezoelectric sensors. *Nano letters*, 19(8), 5410-5416.
- [5] Oughaddou, H., Enriquez, H., Tchalala, M. R., Yildirim, H., Mayne, A. J., Bendounan, A., Dujardin, G., Ali, M. A., Kara, A. (2015). Silicene, a promising new 2D material. *Progress in Surface Science*, 90(1), 46-83.
- [6] Li, L., Lu, S. Z., Pan, J., Qin, Z., Wang, Y. Q., Wang, Y., Cao, G. Y., Du, S., Gao, H. J. (2014). Buckled germanene formation on Pt (111). *Advanced Materials*, 26(28), 4820-4824.
- [7] Akhtar, M., Anderson, G., Zhao, R., Alruqi, A., Mroczkowska, J. E., Sumanasekera, G., Jasinski, J. B. (2017). Recent advances in synthesis, properties, and applications of phosphorene. *npj 2D Materials and Applications*, 1(1), 1-13.
- [8] Manzeli, S., Ovchinnikov, D., Pasquier, D., Yazyev, O. V., Kis, A. (2017). 2D transition metal dichalcogenides. *Nature Reviews Materials*, 2(8), 1-15.

- [9] Zhang, K., Feng, Y., Wang, F., Yang, Z., Wang, J. (2017). Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(46), 11992-12022.
- [10] Wang, S. F., Wu, X. J. (2015). First-principles study on electronic and optical properties of graphene-like boron phosphide sheets. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 28(5), 588.
- [11] Varley, J. B., Miglio, A., Ha, V. A., van Setten, M. J., Rignanese, G. M., Hautier, G. (2017). High-throughput design of non-oxide p-type transparent conducting materials: data mining, search strategy, and identification of boron phosphide. *Chemistry of Materials*, 29(6), 2568-2573.
- [12] Xie, M., Zhang, S., Cai, B., Zhu, Z., Zou, Y., Zeng, H. (2016). Two-dimensional BX (X= P, As, Sb) semiconductors with mobilities approaching graphene. *Nanoscale*, 8(27), 13407-13413.
- [13] Chen, Y., Zhang, X., Qin, J., & Liu, R. (2021). High-throughput screening of single metal atom anchored on N-doped boron phosphide for N₂ reduction. *Nanoscale*, 13(31), 13437-13450.
- [14] Obeid, M. M., Jappor, H. R., Al-Marzoki, K., Hoat, D. M., Vu, T. V., Edrees, S. J., Yaseen, Z. M., Shukur, M. M. (2019). Electronic and magnetic properties of single-layer boron phosphide associated with materials processing defects. *Computational Materials Science*, 170, 109201.
- [15] Galicia-Hernandez, J. M., Guerrero-Sanchez, J., Ponce-Perez, R., Fernandez-Escamilla, H. N., Cocolletzi, G. H., & Takeuchi, N. (2022). Self-energy corrected band-gap tuning induced by strain in the hexagonal boron phosphide monolayer. *Computational Materials Science*, 203, 111144.
- [16] Yazdanmehr, M., Asadabadi, S. J., Nourmohammadi, A., Ghasemzadeh, M., Rezvanian, M. (2012). Electronic structure and bandgap of γ -Al₂O₃ compound using mBJ exchange potential. *Nanoscale research letters*, 7(1), 1-10.
- [17] Tran, F., Blaha, P. (2017). Importance of the kinetic energy density for band gap calculations in solids with density functional theory. *The Journal of Physical Chemistry A*, 121(17), 3318-3325.
- [18] Tran, F., Doumont, J., Kalantari, L., Blaha, P., Rauch, T., Borlido, P., Botti, S., Marques, M. A. L., Patra, A., Jana, S., Samal, P. (2021). Bandgap of two-dimensional materials: Thorough assessment of modern exchange–correlation functionals. *The Journal of Chemical Physics*, 155(10), 104103.
- [19] Gritsenko, O., van Leeuwen, R., van Lenthe, E., Baerends, E. J. (1995). Self-consistent approximation to the Kohn-Sham exchange potential. *Physical Review A*, 51(3), 1944.
- [20] Castelli, I. E., Hüser, F., Pandey, M., Li, H., Thygesen, K. S., Seger, B., Jain, A., Persson, K. A. Ceder, G., Jacobsen, K. W. (2015). New light-harvesting materials using accurate and efficient bandgap calculations. *Advanced Energy Materials*, 5(2), 1400915.
- [21] Ullah, S., Denis, P. A., Menezes, M. G., Sato, F. (2019). Tunable optoelectronic properties in h-BP/h-BAs bilayers: the effect of an external electrical field. *Applied Surface Science*, 493, 308-319.
- [22] Luo, Z., Ma, Y., Yang, X., Lv, B., Gao, Z., Ding, Z., Liu, X. (2020). Native Point Defects in Monolayer Hexagonal Boron Phosphide from First Principles. *Journal of Electronic Materials*, 49(10), 5782-5789.
- [23] Naumis, G. G., Barraza-Lopez, S., Oliva-Leyva, M., Terrones, H. (2017). Electronic and optical properties of strained graphene and other strained 2D materials: a review. *Reports on Progress in Physics*, 80(9), 096501.
- [24] Li, F. Q., Zhang, Y., Zhang, S. L. (2021). Defects and Strain Engineering of Structural, Elastic, and Electronic Properties of Boron-Phosphide Monolayer: A Hybrid Density Functional Theory Study. *Nanomaterials*, 11(6), 1395.
- [25] Enkovaara, J., Rostgaard, C., Mortensen, J. J., Chen, J., Duřak, M., Ferrighi, L., Gavnholt, J., Glinsvad, Haikola, V., Hansen, H. A. Kristoffersen, H. H., Kuisma, M., Larsen, A. H., Lehtovaara, L., Ljungberg, M., Lopez-Acevedo, O., Moses, P. G., Ojanen, J., Olsen, T., Petzold, V., Romero, N. A., Stausholm-Møller, J., Strange, M., Tritsaris, G. A., Vanin, M., Walter, M., Hammer, Häkkinen, V. H., Madsen, G. K. H., Nieminen, R. M., Nørskov, J. K., Puska, M., Rantala, T. T., Schiøtz, J., Thygesen, K. S., Jacobsen, K. W. (2010). Electronic structure calculations with GPAW: a real-space implementation of the projector augmented-wave method. *Journal of physics: Condensed matter*, 22(25), 253202.
- [26] Lisesivdin, S. B., Sarikavak-Lisesivdin, B. (2022). gpaw-tools–higher-level user interaction scripts for GPAW calculations and interatomic potential based structure optimization. *Computational Materials Science*, 204, 111201.
- [27] Şahin, H., Cahangirov, S., Topsakal, M., Bekaroglu, E., Akturk, E., Senger, R. T., Ciraci, S. (2009). Monolayer honeycomb structures of

- group-IV elements and III-V binary compounds: First-principles calculations. *Physical Review B*, 80(15), 155453.
- [28] Zeng, B., Li, M., Zhang, X., Yi, Y., Fu, L., Long, M. (2016). First-principles prediction of the electronic structure and carrier mobility in hexagonal boron phosphide sheet and nanoribbons. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(43), 25037-25042.
- [29] Hasan Khan, M. S., Islam, M. R., Hasan, M. T. (2020). Strain-dependent electronic and optical properties of boron-phosphide and germanium-carbide hetero-bilayer: A first-principles study. *AIP Advances*, 10(8), 085128.
- [30] Çakır, D., Kecik, D., Sahin, H., Durgun, E., Peeters, F. M. (2015). Realization of ap-n junction in a single layer boron-phosphide. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(19), 13013-13020.
- [31] Islam, M. R., Liu, K., Wang, Z., Qu, S., Zhao, C., Wang, X., Wang, Z. (2021). Impact of defect and doping on the structural and electronic properties of monolayer boron phosphide. *Chemical Physics*, 542, 111054.
- [32] Cheng, Y., Meng, R., Tan, C., Chen, X., Xiao, J. (2018). Selective gas adsorption and I-V response of monolayer boron phosphide introduced by dopants: A first-principle study. *Applied Surface Science*, 427, 176-188.
- [33] Wang, Y., Huang, C., Li, D., Huang, F., Zhang, X., Huang, K., Xu, J. (2019). Stress-and electric-field-induced band gap tuning in hexagonal boron phosphide layers. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31(46), 465502.
- [34] Yu, J., Guo, W. (2015). Strain tunable electronic and magnetic properties of pristine and semihydrogenated hexagonal boron phosphide. *Applied Physics Letters*, 106(4), 043107.
- [35] Tran, F., Ehsan, S., Blaha, P. (2018). Assessment of the GLLB-SC potential for solid-state properties and attempts for improvement. *Physical Review Materials*, 2(2), 023802.

Kanser Teşhis ve Tedavisinde Nano/mikromotor Teknolojisi

Ayşegül TÜRKER¹ , Yunus Emre BÜLBÜL² , Ayşegül UYGUN ÖKSÜZ³ , Gözde YURDABAK KARACA^{4*} 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Bölümü, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Isparta, Türkiye

³Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Isparta, Türkiye

⁴Süleyman Demirel Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Bölümü, Isparta, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 09/03/2023
Düzeltilme: 24/05/2023
Kabul: 08/06/2023

Anahtar Kelimeler

Nano/mikromotorlar
Kanser
Teşhis
Tedavi
Hareket Kontrolü

Article Info

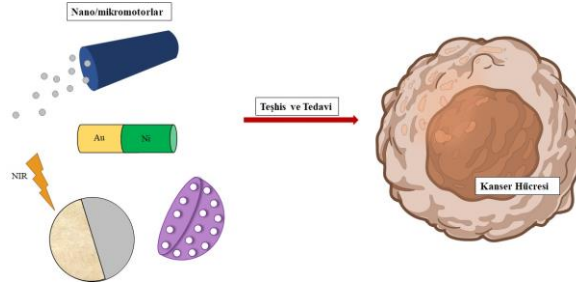
Review article
Received: 09/03/2023
Revision: 24/05/2023
Accepted: 08/06/2023

Keywords

Nano/micromotors
Cancer
Diagnosis
Treatment
Propulsion Control

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Derlemede nano/mikromotorların tanımı, çeşitleri, sentez yöntemleri, kanser teşhis ve tedavisindeki uygulamaları ve literatürdeki ilk örneklerine yer verilmiştir. / The review provides a description of nano/micromotors, their types, synthesis methods, cancer diagnosis and treatment applications and initial examples in the literature.



Şekil A: Nano/mikromotorların kanser teşhis ve tedavi sürecindeki etkinliği / **Figure A:** The effectiveness of nano/micromotors in cancer diagnosis and treatment processes

Önemli noktalar (Highlights)

- Nano/mikromotorlar, enerjiyi harekete dönüştürebilen makinelerdir/ Nano/micromotors are machines capable of converting energy into motion.
- Nano/mikromotor teknolojisi kanserle mücadelede yeni ve etkili yöntemler sunmaktadır. / Nano/micromotor technology offers new and effective methods in the fight against cancer.
- İlaç taşıma ve bölgesel tedavi gibi yenilikçi yöntemlerle tedavi etkinliğini artırırken yan etkileri en aza indirebilmektedir. /It can enhance treatment efficacy while minimizing side effects through innovative methods such as drug delivery and targeted therapy.

Amaç (Aim): Bu derlemede nano/mikromotorların sınıflandırılması ve sentez yöntemleri ele alınmakla birlikte, nano/mikromotorların kanser teşhis ve tedavisinde kullanımı tartışılmıştır. / This review addresses the classification and synthesis methods of nano/micromotors, and also discusses the use of nano/micromotors in cancer diagnosis and treatment.





Özgünlük (Originality): Bu derlemede, nano/mikromotorların en önemli biyomedikal uygulamalarından biri olan kanser teşhis ve tedavisi için gelişim süreci ve gelinen son noktalardan bahsedilmiştir. / This review discusses the synthesis methods of nano/micromotors used in cancer diagnosis and treatment.

Bulgular (Results): Nano/mikromotor teknolojisi, kanser teşhisinde daha hassas ve erken bir yaklaşım sağlayarak tedavi sürecini iyileştirebilir. Ayrıca, ilaç taşıma ve bölgesel tedavi gibi yenilikçi yöntemlerle tedavi etkinliğini artırırken yan etkileri en aza indirebilir. / Nano/micromotor technology can improve the treatment process by providing a more precise and early approach to cancer diagnosis. Additionally, it can enhance treatment efficacy while minimizing side effects through innovative methods such as drug delivery and targeted therapy.

Sonuç (Conclusion): Nano/mikromotorların sentezi ve uygulamasıyla ilgili araştırmalar, kanser teşhis ve tedavisinde önemli bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir. / Research on the synthesis and application of nano/micromotors demonstrates their significant potential in cancer diagnosis and treatment.



Kanser Teşhis ve Tedavisinde Nano/mikromotor Teknolojisi

Ayşegül TÜRKER¹ , Yunus Emre BÜLBÜL² , Ayşegül UYGUN ÖKSÜZ³ , Gözde YURDABAK KARACA^{4*} 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Bölümü, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Isparta, Türkiye

³Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Isparta, Türkiye

⁴Süleyman Demirel Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Bölümü, Isparta, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 09/03/2023
Düzeltilme: 24/05/2023
Kabul: 08/06/2023

Anahtar Kelimeler

Nano/mikromotorlar
Kanser
Teşhis
Tedavi
Hareket Kontrolü

Öz

Nano/mikromotorlar, enerjii harekete dönüştürme kabiliyetine sahip nano veya mikro boyutta makinalardır. Bunlar; kimyasal yakıt ve harici etkenler neticesinde enerjii harekete dönüştürme prensibi ile çalışırlar. Bu harici etkenler; manyetik alan, elektrik alan, ultrason ve ışık gibi etkenler olabilir. Farklı tahrik mekanizmalarına sahip nano/mikromotorlar kanser ve bulaşıcı hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli rol oynarlar. Özellikle kanser tedavilerinde en çok tercih edilen yöntem olan kemoterapi ve radyoterapi gibi yöntemlerin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, araştırmacıları nano/mikromotor çalışmalarına yönlendirmiştir. Nano/mikromotorlar; kanserleşmiş hücrenin erken teşhisini mümkün kılması ve geleneksel kanser tedavilerindeki yan etkilerin en aza indirilmesi gibi avantajlara sahiptir. Bu derlemede nano/mikromotorların sınıflandırılması ve sentez yöntemleri ele alınmakla birlikte, nano/mikromotorların kanser teşhis ve tedavisinde kullanımı tartışılmıştır.

Nano/micromotor Technology in Cancer Diagnosis and Treatment

Article Info

Review article
Received: 09/03/2023
Revision: 24/05/2023
Accepted: 08/06/2023

Keywords

Nano/micromotors
Cancer
Diagnosis
Treatment
Propulsion Control

Abstract

Nano/micromotors are machines in the nano or micro scale that are capable of converting energy into motion. They operate on the principle of converting energy into motion through chemical fuel and external factors. These external factors can include magnetic fields, electric fields, ultrasound, and light. Nano/micromotors with different propulsion mechanisms play an important role in the diagnosis and treatment of cancer and infectious diseases. The negative effects of cancer treatments such as chemotherapy and radiotherapy on human health have led researchers to focus on nano/micromotor studies. Nano/micromotors have advantages such as enabling early diagnosis of cancer cells and minimizing the side effects of traditional cancer treatments. This review discusses the classification and synthesis methods of nano/micromotors, as well as their use in cancer diagnosis and treatment.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde nano/mikromotorlar, önemli uygulamaları ve yeni işlevleri nedeni ile büyük ilgi görmektedir [1]. Enerjii verimli bir şekilde harekete dönüştürebilen nano/mikromotorlar katalitik reaksiyonlar ya da dışarıdan bir etki ile hareket yeteneğine sahip olurlar [2-3]. Bunlar kimyasal veya manyetik alan, elektrik alan, ultrasonik gibi dışarıdan uygulanan enerjii otonom harekete dönüştürerek kendilerini hareket ettirebilen minyatürleşmiş nano veya mikro boyutta

cihazlardır [3]. Moleküler ölçekli mekanik nanomakinelere ilk olarak 1959'da Nobel Fizik ödülüne sahip Richard Feynman bahsetmiştir. Feynman'ın "Altta çok yer var" başlıklı Amerikan Fizik Topluluğuna yapmış olduğu sunumu nanoteknolojinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir [4]. Feynman bilim adamlarına ve mühendislere nano ölçekli cihazların ve mikro ölçekli sistemlerin tasarımı ve üretimi konusunda öncü olmuştur [5]. Mikromotorların imkan tanıdığı erişilebilirlik ve güç, karmaşık biyomedikal

sorunların çözüme kavuşmasına umut vaat etmektedir [6].

Farmasötik teknoloji ve yapılan ilaç çalışmalarında şimdiye kadar geline aşamada hala kanser ve bulaşıcı hastalıklar en büyük 10 küresel ölüm nedeni arasında yerini korumaktadır. Kanser ve bulaşıcı hastalıklar, dünya çapında yılda 60 milyon ölüme neden olmaktadır [7]. Dünya'da bulunan nüfusun yapısını, durumunu ve dinamik özelliklerini inceleyen bilim dalı olan küresel demografik özellikler, 2025 yılına kadar her yıl 20 milyondan fazla yeni kanser vakasının beklendiğini göstermektedir. Önümüzdeki on yılda kanser insidansının artması bu beklentiler içerisinde yer almaktadır [8].

Amerika Birleşik Devletleri'nde cinsiyet ve kanser türüne bağlı yapılan 2023 tahminlerine göre toplamda her gün yaklaşık 5370 vaka ve buna eşdeğer yaklaşık 1.958.310 yeni kanser vakası olacağı ön görülmektedir. Bu verilerin cinsiyet bazında dağılımı incelendiğinde; kadınlarda %31 oranı ile meme kanseri en sık gözlenen kanser türü olacağı ön görülmektedir. Bunu sırası ile akciğer ve bronş (%13), kolon ve rektum (%8), rahim ağzı (%7), cilt melanomu (%4), non-hodgkin lenfoma (%4), tiroid (%3), pankreas (%3), böbrek ve renal pelvis (%3) ve lösemnin (%3) takip edeceği ön görülmektedir. Erkeklerde ise prostat (%29) kanseri en sık gözlenmesi beklenen kanser türüdür. Bunu da sırası ile akciğer ve bronş (%12), kolon ve rektum (%8), mesane (%6), cilt melanomu (%6), böbrek ve renal pelvis (%5), non-hodgkin lenfoma (%4), ağız boşluğu ve farenks (%4), lösemi (%4) ve pankreas (%3) kanserinin takip edeceği ön görülmektedir. Bunun yanı sıra kanser ölümlerinde cinsiyete bağlı farklılıklar mevcut olmakla birlikte en çok ölüme sebebiyet verecek olan akciğer ve bronş kanserinin öldürücü etkisinin kadınlarda ve erkeklerde aynı oranda olacağı tahmin edilip bu oranın %21 olacağı ön görülmektedir. Yine aynı verilere dayanarak toplamda her iki cinsiyette en sık gözlenecek olan kanser türünün meme (300,590) kanseri olacağı söylenebilir. En çok ölüme sebebiyet verecek kanser türü ise her iki cinsiyette de istatistiksel olarak bildirildiği gibi akciğer (127,070) kanseridir [9]. İnsan hayatını ve sağlığını tehdit eden önemli hastalıklardan biri olan kanserin klinik tedavisinde kemoterapi yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Ancak kemoterapi ve radyoterapi gibi yöntemlerin ciddi yan etkileri mevcut tedavilerin etkinliğini engelleyen dezavantajlardandır [11]. Bahsi geçen dezavantajlar; çoğu antikanser ilacının suda zayıf çözünürlüğü, düşük biyoyararlanımı ve antikanser ilaçlarının klinikteki etkinliğini zayıflatan ciddi yan etkileri şeklindedir [10]. Geleneksel

nanoteknolojinin gelişimi ise kanser teşhis ve tedavisinde birçok olanak sağlamıştır. Özellikle erken teşhisi mümkün kılması en çarpıcı olanaklarından. Bunun için nano/mikromotorun hücreye girmesi yeterlidir. Teşhis süreci sonrasında tedavi için nano/mikromotor yine doğrudan hedef hücreye yönelir, kemoterapinin aksine sağlıklı hücreler bundan etkilenmez [12]. Kendinden tahrikli nano/mikromotorlar ilaç dağıtımı, kanser hücresi algılama, nükleik asit ve protein tanıma gibi özelliklere sahiptir. Aynı zamanda tübüler mikro jetler, Janus ve tel şekilli nano/mikro yapılar gibi farklılık gösteren nano/mikro ölçekli motorlar hareket kontrolü sağlamıştır [13]. Sentetik nanomotorların vücudun daha önce ulaşılabilmiş olan bölgelerine terapötik yükleri taşıma yeteneği nanomotorların gelişiminde bir sonraki beklentilerden biri olmuştur [14]. Bununla birlikte son yıllarda, teşhis ve tedavi, *in vivo* operasyonlar için biyomedikal nano/mikro motorlar için yapılan araştırmalar katlanarak artmaktadır. Hedefe yönelik kargo ilaç salımı, kanser hücresinin izolasyonu, mikromotor temelli immünolojik testler ve cep telefonu tanılama ile entegrasyon yapılan mevcut araştırmalardandır [15].

Bu incelemede, kanser teşhis ve tedavisinde kullanılan nano/mikromotorların sentez yöntemleri, en önemli biyomedikal uygulamalarından biri olan kanser teşhis ve tedavisi için gelişim süreci ve geline son noktalardan bahsedilmiştir.

2. NANO/MİKROMOTOR ÇEŞİTLERİ VE SENTEZ YÖNTEMLERİ (TYPES OF NANO/MICROMOTORS AND SYNTHESIS METHODS)

2.1. Nano/Mikromotor Çeşitleri (Types of Nano/Micromotors)

Nano/mikromotorlar; kimyasal olarak çalışan, harici alandan güç alan ve biyohibrit nano/mikromotorlar olarak üç alt başlıkta incelenebilir.

2.1.1. Kimyasal Olarak Çalışan Nano/mikromotorlar (Chemically-Powered Nano/Micromotors)

Kimyasal olarak güçlendirilmiş nano/mikromotorlar, kimyasal enerjiyi mekanik itici güçlere dönüştürerek kendi kendine hareket edebilme kabiliyetine sahiptirler [16]. Kimyasal reaksiyonlar yoluyla kendi kendine hareket yetenekleri elde eden kimyasal nano/mikromotorlar, hareket kabiliyeti açısından daha fazla olasılık sağlamaktadır. Ayrıca kimyasal nano/mikromotorlar, hareketi sağlayacak herhangi

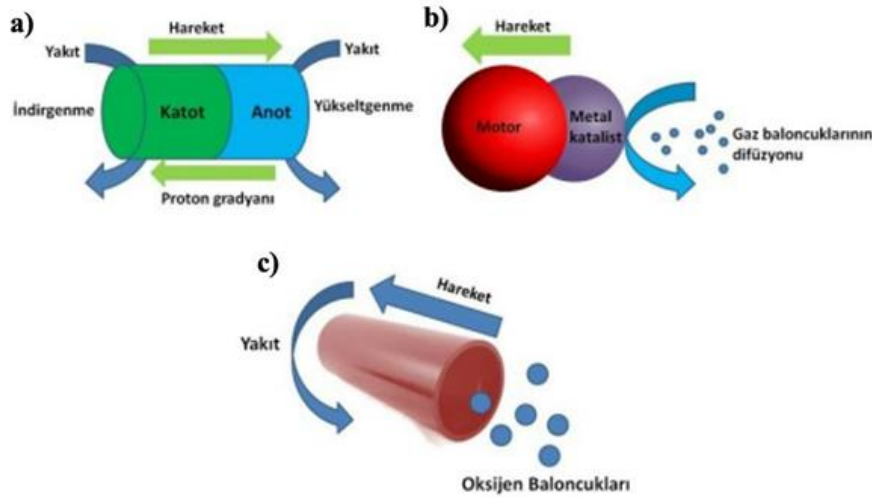
bir dış etken olmaksızın yani ek cihazlar olmadan kendinden tahrikli hareket sağlayabilmektedirler [17].

Self-elektroforez güdümlü nano/mikromotorlar genellikle doğrudan harici elektrik alana yanıt vermezler. Alternatif olarak kimyasal gradyanlar kullanır ve yerel bir elektrik alan üreterek iyonların asimetrik dağılımına sebebiyet veren kendiliğinden üretilen elektrik alana tepki olarak Şekil 1a prensibinde hareket eder [3].

Elektrolit (iyonik) ve elektrolit olmayan (iyonik olmayan) iki farklı türde difüzyoforez vardır.

Kendinden difüzyonlu nano/mikromotorlar hareket kabiliyeti olarak; kendiliğinden oluşan bir konsantrasyon gradyanı ile Şekil 1b prensibinde kendini ilerletebilir. Bu hareket kabiliyeti, yüzeyde reaktanları tüketen ve ürünler oluşturan kimyasal reaksiyonlar tarafından sağlanır [18].

Kabarcık tahrikli nano/mikromotorlar, genellikle Şekil 1c'de görüldüğü gibi peroksit ve biyoaktif sıvılardan oluşan biyokimyasal yakıt arasında reaksiyondan üretilen kabarcıkların püskürtülmesinin geri tepme etkisiyle tahrik edilir [19].



Şekil 1. Mikro/nanomotorların itme mekanizmalarının şematik gösterimi a) Kendi kendine elektroforez, b) Difüzyoforez, c) Kabarcık itme [20] (Schematic representation of propulsion mechanisms of micro/nanomotors: a)Self-electrophoresis,b) Diffusiophoresis,c) Bubble propulsion)

Kimyasal olarak çalışan birçok nano/mikromotor, H_2O_2 'nin katalitik reaksiyonu prensibine dayanır [21]. İlerleyen çalışmalar için tahrik yakıtlarının toksisitesi insan vücudundaki uygulamalarını sınırlandırmıştır [17]. Toksikiteyi düşürmek amacı ile H_2O_2 'nin insan vücudunda kullanımı için uygulama konsantrasyonu %3'ten %0.05'e düşürülerek toksisite derecesinin düşürülmesi sağlanmıştır [21]. Bazı büyüme faktörleri ve sitokinlerin kanser hücrelerinde hidrojen peroksit ve nitrik oksit düzeylerini arttırdığı bilinmektedir [22]. Dolayısıyla kanser hücresinin kendiliğinden sahip olduğu belli bir H_2O_2 düzeyi vardır. Yapılan çalışmalarda uygulanan H_2O_2 konsantrasyonunun hala kanser hücrelerindeki daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır [23]. Bu da kanser tedavisinde uygulanabilecek yöntemler için daha güvenli kimyasal tahriğin keşfedilmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Ayrıca, bazı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda metalden üretilen O_2 kabarcıkları tahrikli H_2O_2 'nin katalitik ayrışmasının organizmalar için toksik olduğu kanıtlanmıştır [24]. Ayrıca araştırmacılar nano/mikromotorları daha

düşük H_2O_2 konsantrasyonu üzerinden ilerletmişlerdir. Bunun doğrultusunda Wilson grubu, biyo-indirgeyici koşullar altında ilaç salınımını tetiklemek için redoks duyarlı bir stomatosit nano/mikromotor sistemi önermişlerdir [25]. Wilson grubunun bu çalışmaları Choi ve arkadaşlarına ilham olmuş ve nano/mikromotorların toplu hareketini kontrol etmek için daha basit bir yanıt yöntemi önermişlerdir [26]. Bunun yanı sıra biyoyumluluk açısından alternatif yakıt olarak; vücuttaki glikoz, üre, su ve diğer mevcut doğal maddeler geniş çapta incelenmiştir. Mou ve arkadaşları Mg-su ve Mg-vücut sıvısı reaksiyonlarını kullanarak biyoyumlu kabarcık tahrikli Mg tabanlı mikromotorlar oluşturmayı önermişlerdir [27-28]. Ek olarak enzimatik nano/mikromotorlar biyoyumlu yakıtlar olarak biyoyararlı kimyasalları (glikoz, üre vb.) kullanabilir. Buna dair deneysel sonuçlar, iyonik ortamlarda (fosfat tampon çözeltisi) bile normal şekilde işlev görebileceklerini ve büyük miktarlarda anti-kanser ilacı (Doksorubisin, DOX) yüklenebilir

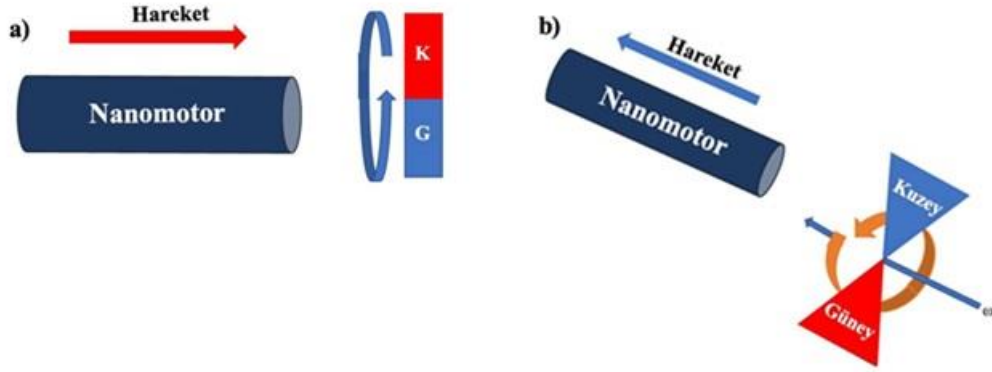
olduğunu ve bunları aktif olarak kanser hücrelerine taşıyabildiklerini kanıtlamıştır [29].

2.1.2. Harici Alandan Güç Alan Nano/mikromotorlar (Externally-Powered Nano/Micromotors)

Harici alandan güç alan nano/mikromotorlar, manyetik ve elektrik alan etkisi altında, ultrason, ışık veya bunların birlikte kullanıldığı ortamlarda hareket edebilme yeteneğine sahip sistemlerdir [21]. Kimyasal olarak çalışan nano/mikromotorlar ile kıyaslandığında, harici alandan güç alan nano/mikromotorlar daha iyi kontrol edilebilirlik, uzun ömür ve daha az zararlı istenmeyen etki avantajlarına sahiptir. Bu nedenle biyomedikal

alanda daha geniş bir uygulama beklentisi yaratır [29].

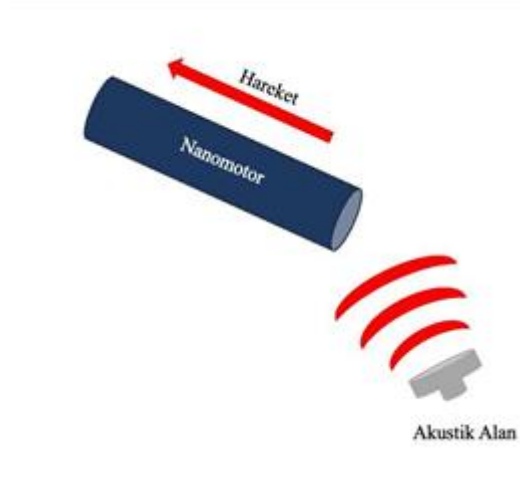
Manyetik alan güdümlü nano/mikromotorlar harici manyetik alanlardan güç alırlar. Bunlar; dönen, salınan ve kapalı manyetik alanlardır [30-31-32]. Manyetik alan güdümlü nano/mikromotorlar genel itibariyle iki hareket tipine sahiptirler. İlki; nano/mikromotorlar Şekil 2a'da şematize edilmiş yapı itibariyle dönen veya salınan bir manyetik alana uygulandığında, yapılarını karşılıksız bir şekilde deforme ederek düşük Reynolds sayılı akışkanlarda hareket edebilir [33]. İkincisi; nano/mikromotorların deneyimlendiği gibi manyetik alanlar, Şekil 2b'de şematize edildiği gibi çevrede asimetrik bir kuvvet alanı üreterek nano/mikromotorları itebilir [34-35].



Şekil 2. Manyetik alan güdümlü nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi (Schematic representation of the principle of motion for magnetically guided nanomotors)

Ultrason tabanlı tahrik için araştırmacılar tarafından üç mekanizma önerilir. İlki; Şekil 3'te şematik formu verilen nanoçubukların bileşiminin veya şeklinin asimetrisinin ultrasonik alan altında rastgele yönelime sebebiyet verebilecek metalik nanoteller için geçerli olan kendi kendine akustik mekanizmadır. Örnek olarak; Wang ve arkadaşları silika ve floresan nanokürelerden yapılmış nanomermilerle dolu içi boş, konik şekilli bir mikrotop geliştirdi. Ultrason altında mikrotopun iç yüzeyinde bulunan perflorokarbon emülsiyonu

anlık buharlaşmaya uğramıştır. Mikrotopun yüksek hızda hareket etmesine sağlayan nanomermilerin hızlı bir şekilde fırlatılması ile sonuçlanır [36]. Üçüncüsü ise hava kabarcıkları ile hapsedilmiş nano/mikromotorlar için geçerlidir. Uygulanan ultrasonik alan akustik akışların oluşumuna yol açabilir ve onları yönlendirebilir [37]. Ultrasonik alan nano/mikromotorların hareketini kontrol etmek için kullanılmasının yanı sıra, kümelenme davranışları üzerinde bir tahrik mekanizması oluşturmak için de kullanılmıştır [38].

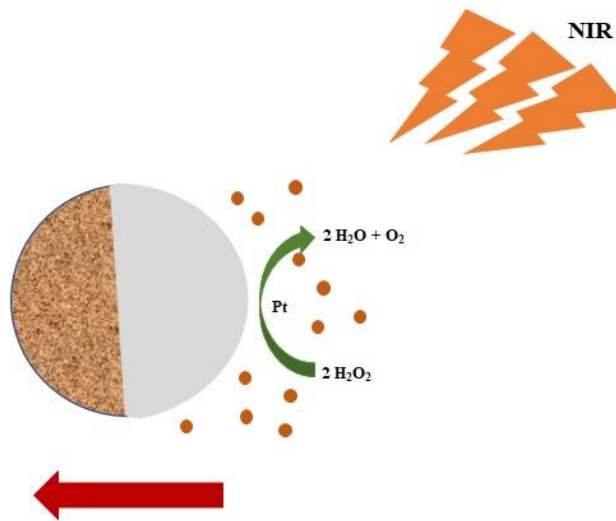


Şekil 3. Ultrasonik/akustik alan güdümlü nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi (Schematic representation of the principle of motion for ultrasound/acoustic field-guided nanomotors)

Zhang ve grubu, 2012 yılında ilk kez ışıkla çalışan nano ölçekli bir plazmit motor bildirmiştir [39]. Feringa grubu tarafından bildirilen ilk ışıkla çalışan tek yönlü moleküler motorun üzerinden on bir yıl geçmiş ve o zamandan bu yana UV/Vis ve yakın kızılötesi (NIR) ışık, nano/mikromotorları çalıştıran ana ışık kaynakları haline gelmiştir [40-41]. Dolayısıyla ışık, nano/mikromotorları harekete geçirmede, hareketi kontrol etmede, kolektif yürütmede avantajını göstermektedir. Nano/mikromotorların otonom hareketi; ışık kaynaklı fiziksel etkiler, ışık kaynaklı kimyasal reaksiyonlar ve ışık kaynaklı yapısal deformasyonuna bağlıdır [42]. Bu nedenle hareket üretebilmek için ışıkla çalışan nano/mikromotorların yerel, tekdüze olmayan bir

gradyan (çoklu ışık girdisinin tek boyuta dönüştüğü) alanı üretmesi ya da periyodik olarak yapısal deformasyonunu gerçekleştirilmesi gerekir [36-43]. Düzgün olmayan gradyan alanı, düzgün olmayan ışık alanı kullanılarak veya asimetrik yapı tasarlanarak oluşturulabilir [31].

Işık tahrikli nanomotorlarda çift tahrikli hareket mekanizması oldukça tercih edilen yapılandıdır. Şekil 4'te şematize edilmiş olan NIR tahrikli Janus nanomotor, Xing ve grubu tarafından önerilmiştir. Katalitik/NIR tahrikli hareket mekanizmasına sahip Janus nanomotorları güçlü hidrofobik etkileşim ve yüksek ilaç yüklemesine sahiptir. Genel itibariyle önerilen bu yapı çift tahrikli otonom hareket kabiliyetine sahip taşıma sistemlerinin bir örneği olarak sunulmuştur [44].



Şekil 4. Işık tahrikli nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi (Schematic representation of the principle of light-driven nanomotors motion)

Nano/mikromotorların ayrıca bir enerji kaynağı olarak elektrik alandan bahsedilebilir ve elektrik alanı kullanmak için dört farklı yöntem mevcuttur. İlki; metal dielektrik Janus mikro partikülünü farklı şekilde polarize etmek için alternatif akım (AC) elektrik alanı uygulamaktır. Neticesinde mikro partikülün metal tarafından uzaklaşmasını sağlayan asimetric elektro osmotik akışlar meydana gelir. İkinci yöntem, diyotun AC elektrik alanını, elektrokinetik akışları daha da indükleyen ve kendiliğinden çalıştırmayı sağlayan bir doğru akım elektrik alanına doğrultma yeteneğinden faydalanır. Üçüncü yöntem, kimyasal reaksiyona neden olmak için elektrik alanını kullanmaktır. Son yöntem Quincke etkisinden faydalanır. Bir AC elektrik alanı, dielektrik mikromotorların düşük iletkenliğe sahip sıvı ortamda dönmesine ve hedefleme bölgesine hareket etmesine izin veren elektrokinetik etkiyi indükleyebilir [34]. Elektrik ile çalışan

nano/mikromotorlar, yüksek hassasiyet ve çok yönlülük ile pens ampermetre tarafından daha fazla manipüle edilmesine rağmen, elektrik alan tahrikli nano/mikromotorların biyolojik uygulamaları, kısa hareket aralıkları ve yüksek iyonik biyo ortamdaki biyoyumluluk eksikliği nedeniyle sınırlı olabilir [31-36-45].

Guo ve arkadaşları çok yönlü bir yaklaşım olarak katalitik nanomotorların elektrik alan tahrikli yönlennesini önermişlerdir. Yapılan çalışma Şekil 5'te şematize edildiği gibi pens ampermetrelerin stratejik olarak birleştirildiği AC ve doğru akım (DC) elektrik alanlarına dayanır. DC elektrik alanı taşıma hızını ayarlarken, AC elektrik alanı nanomotorların bağımsız olarak hizalamayı yönlendirir. Birleştirilmiş AC ve DC elektrik alanları 3 boyutlu olarak uygulandığı takdirde nanomotorların kontrollü hareketi sağlanabilir [46].



Şekil 5. Elektrik alan tahrikli nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi [46] (Schematic representation of the principle of motion for electric field-driven nanomotors)

2.1.3. Biyohibrit Nano/mikromotorlar (Biohybrid Nano/Micromotors)

Biyohibrit nano/mikromotorlar; canlı olmayan sistemlerin çeşitli molekül, hücre, organizma ve doku ölçeklerinde biyolojik bileşenlerle birleştirilmesiyle geliştirilebilir [47]. Biyomimetik davranış sergileyebilen ve isteğe bağılı görevleri yerine getirebilen biyohibrit nano/mikromotorlar geliştirmek için uygun yapı tasarımı, fonksiyonel modifikasyon ve güçlü aktüatörlerin kullanılması gereklidir [48].

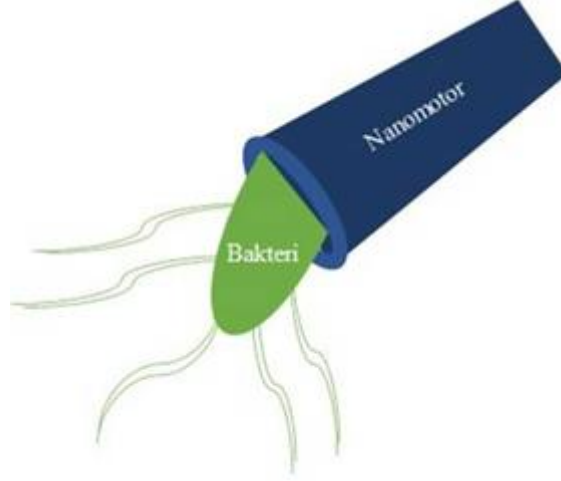
Biyolojik hibrit ilaç salım platformları, gelecekteki tıbbi uygulamalarda ideal ilaç salım platformu adayı olma potansiyeli ile öne çıkar. Yüksek fizyolojik uygulanabilirlikleri ve fonksiyonel immün supresyonları nedeniyle, tasarlanmış biyolojik

hareketli organizmalar veya hücreler yüklü ilaçları korumak veya içlerine ilaçları kapsülleyerek normal hücreler veya dokular üzerinde ciddi yan etkilere neden olmalarını önlemek için olağanüstü yetenekler göstermiştir. Ayrıca yüksek biyoyumlulukları ve hücre afiniteleri, lezyonların ilaç alım oranını arttırmayı kolaylaştırır. İlaveten, hedeflenen kargo veya ilaç salımını sağlamak için hem eksojen (yani besinler, oksijen ve pH) hem de endojen (ışık, ultrason, manyetik alanlar ve elektrik alanları) uyarılara yanıt verebilirler [19].

Doğada bulunan organizmalar, esnek bir şekilde kendi kendine hareket edebilen ve belirli bir aralıkta değışen çevreye uyum sağlayabilen çoklu verimli çalıştırma sistemlerine dönüşmüştür [49]. Araştırmacılar, bir veya daha fazla bakteriyi suşunu manyetik nano/mikro partiküller ile birleştirmiştir.

Böylelikle harici bir manyetik alana maruz kaldığında, bu manyetik alan yönünde yer değiştirir ve sonrasında bakteriler bu manyetik alan yönünde hareketi mümkün olacaktır. 2017 yılında Sitti ve arkadaşları E. coli'yi DOX ve bir küçük manyetik nanopartikül tabakasından oluşan mikro partiküllere mıknatıs ile bağlamışlardır. Bu çözüm, tümör hücrelerine yalnızca ilaç mikro

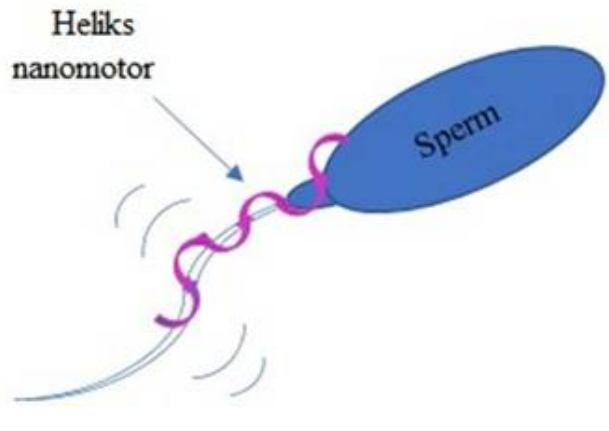
partiküllerinin eklenmesi yöntemine kıyasla ilaçların tümör hücrelerine hedeflenmesini iyileştirmiştir [50]. Ayrıca, bakterilerin manyetik mikro yapılarla entegrasyonuna dayanan bakteri bazlı mikromotorlar (Şekil 6) ve hareketli spermatozoa dayanan sperm bazlı mikromotorlar (Şekil 7) son zamanlarda rapor edilmiştir [51].



Şekil 6. Bakteri bazlı nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi (Schematic representation of the principle of motion for bacteria-based nanomotors)

Sperm bazlı nano/mikromotorların biyolojik özellikleri tıbbi uygulamalar için büyük önem arz eder. Bakteriler ve diğer hücre taşıyıcılar ile kıyaslandığında sperm, oosit ve hızlı hareket için özel bir tanımlamaya sahiptir. Bu da jinekolojik hastalıkların tedavisinde kullanılmasını sağlar [52]. Sperm, nano/mikromotora viskoz biyoakışkanlar arasında hareket etmek için itici güçlerin yanı sıra terapötik ilaçları veya görüntüleme ajanlarını yüklemek için yeterli alan

sağlayabilir. Ayrıca, yüklü ilaçları immünosupresyon yoluyla klirensten koruyabilen zar üzerinde bulunan birkaç madde dışında eşsiz akrozom yapılarının hedef hücrelerin ilaç alımı için faydalı olan sperm ve somatik hücreler arasında hücre füzyonunu indüklediği doğrulanmıştır [53]. Sperm-biyohibrit nano/mikromotor ortamları, kanser tedavisinin veya üreme sistemindeki diğer hastalıkların ilaç dağıtımını için uygulanmak üzere umut vaat eder [19].



Şekil 7. Sperm bazlı nanomotorların hareket prensibinin şematik gösterimi (Schematic representation of the principle of motion for sperm-based nanomotors)

2.2. Kendinden Tahrikli Nanomotorlar (Self-Propelled Nanomotors)

Kendinden tahrikli nano/mikromotorlar veya yüzücüler, çevresel izleme, biyoalgılama veya yeni nesil ilaç taşıyıcıları olarak öngörülen uygulamalarla pasif muadillerine bir alternatif olarak geliştirilmiştir [38]. Kendinden tahrikli nano/mikromotorların ilk çalışmaları düşük viskoziteye sahip ortamlarda denenmiş olup, ilerleyen zaman diliminde yüksek viskoziteye sahip hücre ortamı, kan ve idrar gibi protein içeren ortamlarda çalışılmıştır [54]. 2020 yılında Liu ve ekibi beyin gibi karmaşık bir ortam için NIR ışık aydınlatması altında kendi kendine termoforetik hareket gösteren, NIR ışıkla tetiklenen bir Janus motoru bildirmişlerdir [55]. Yine aynı yıl içerisinde Venegopalan ve ekibi tarafından insan kanındaki manyetik mikromotorların dinamiği incelenmiştir [56]. Kan ortamı için farklı bir bakış olarak Xu ve ekibi kanda dolaşan tümör hücrelerini tespit etmek için NIR tahrikli motorlar geliştirmişlerdir [57]. Güncel literatür baz alındığında motorun otonom hareketi için yalnızca H_2O_2 yakıtının tercih edilmesinin yanı sıra çift tahrik mekanizması da oldukça tercih edilmektedir. Karimi ve ekibi H_2O_2 yakıtı ile katalitik olarak hareket sağlayan disk şeklinde nanomotorlar sentezlemiş ve anti-kanser ilacı olan quercetin kullanarak tümör bölgesine müdahale etmişlerdir. Çalışmada sentezlenen platin bazlı motor, H_2O_2 'i su ve oksijene ayrıştırma sureti ile kabarcıklar üreterek hareket eder [58]. Xing ve ekibinin tümör penetrasyonu için H_2O_2 ve NIR çift tahrikli karbon/mangan nanomotorlar çalışması ise çift tahrikli motor hareketine örnek olarak verilebilir [59]. Güncel literatürde Xing ve ekibi tarafından yine aynı çift tahrik mekanizmasına sahip nanokatalitik terapi için bakır tek atomlu nanomotor sentezlenmiştir [60]. W. Wang ve ekibi de aynı şekilde kimyasal-NIR çift tahrikli nanomotor bildirmişlerdir. Bu çalışmada CuS/Pt Janus nanomotorları sentezlenmiş olup bu yapılar hem H_2O_2 hem de NIR ile yönlendirilmiştir. H_2O_2 bu çalışmada otonom hareket sağlamanın yanı sıra aynı zamanda serbest oksijen radikali (ROS) üreterek fotodinamik terapiye (PDT) katkıda bulunur [61]. Bu çalışmalar üzerine gidilerek tümör mikroçevresi gibi karmaşık ortamlar için kendinden tahrikli nano/mikromotor çalışmaları devam etmektedir.

2.3. Tübüler Nanomotorlar (Tubular Nanomotors)

Çeşitli geometrik boyutlara sahip gerinimle tasarlanmış boru şeklindeki mikro jet motorları, sulu bir ortamda ilginç otonom hareketler sağlar

[62]. Bu tübüler mikrojet yapıların sentezi için kullanılan iki farklı yöntem mevcuttur. Şablon olarak kullanılan nanomembranların sarılması ve membranların gözeneklerine elektrodepozisyonu ile sentezlenirler [63]. Tübüler mikrojetlerin iç yüzeyinde katalitik reaksiyonları tetikleyerek kabarcık oluşumu ile hareket sağlayan birtakım yakıtlar kullanılmaktadır [64-65]. Bu tür yapılar kabarcık itme mekanizması vasıtası ile hareket ederler ve genel olarak H_2O_2 , su ve asitler yakıt olarak tercih edilir [63]. Ancak katalitik tahrikli mikrojetlerin tıbbi ve çevresel uygulamalarında sınırlamalar olduğu için araştırmacılar mikrojetler için biyoyumlu yakıt bulmaya yönelmişlerdir. Bunun neticesi olarak da biyomoleküllerin ve hareketli hücrelerin kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda sperm hücreleri ve enzimler mikrojetlerin hareketi için uygun bulunmuştur [52-66].

2.4. Janus Nanopartiküller (Janus Nanoparticles)

Adını Roma mitolojisinde iki zıt ve farklı yüze sahip olarak tasvir edilen kapıların tanrısı Janus'tan alan "Janus" parçacığı De Gennes'in çalışmalarından sonra yaygın olarak bu isimle kullanılmıştır [67]. Bu parçacıklar, karşıt işlevsellikler taşıyan yüzey aktif maddeler gibi belirli moleküllerin davranışını taklit etmeye çalışırlar. Janus nanoparçacıklarının ikili doğası, onlara, kontrollü boyut ve şekle sahip kümeler oluşturma yeteneği, benzersiz yüzey özellikleri ve çoklu uyaranlara yanıt verme gibi özellikler kazandırır. Tarihsel olarak, Janus nanoparçacıklarını hazırlamak için kullanılan ilk teknikler; blok kopolimerlerin kendiliğinden birleşmesi ya da önceden hazırlanmış homojen veya çekirdek-kabuk parçacıklarının yüzeylerinde uyumsuz ligandların rekabetçi adsorpsiyonuna dayanmaktadır [68]. Günümüzde Janus nanopartikül sentezi için maskeleme, püskürtme, pickering emülsiyon, ligand değişim, faz ayrımı, mikroakışkan yöntemi, tohum aracılı polimerizasyon, kendi kendine montaj gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [69]. Janus nanopartiküllerinin biyomedikal uygulamaları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar içerisinde katalitik uygulamalar, biyosensörler, biyoalgılama, ve terapötik uygulamalar yer almaktadır [69,70].

2.5. Nano/Mikromotorların Sentez Yöntemleri

(Synthesis Methods of Nano/Micromotors)

Nano/mikromotor sınıflarının tahrik mekanizmaları ve sentez tekniklerinin literatüre göre genel özeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Nano/mikromotor sınıflarının Çeşitleri, Tahrik Mekanizmaları ve Sentez Yöntemleri (Types of Nano/Micromotor Classes, Propulsion Mechanisms, and Synthesis Methods)

Nano/mikromotor Sınıfı	Çeşidi	Tahrik Mekanizması	Sentez Yöntemi	Kaynak
Katalik	Nanotel	Kimyasal tahrik (Baloncuk)	Kalıp-membran elektro biriktirme	[3]
	Nanotüp	Kimyasal tahrik (Baloncuk)	Kalıp-membran elektro biriktirme	[71]
	Nano/mikrotüp	Kimyasal tahrik (Baloncuk)	Rolled-up teknoloji	[72]
	Janus Mikromotor	Kimyasal tahrik (Baloncuk)	Fiziksel Buhar Biriktirme	[73-74]
Manyetik	Heliks mikromotor	Manyetik alan	Kendi kendine kaydırma (self-scrolling) tekniği	[75]
	Sert/ esnek nanoteller	Manyetik alan	Kalıp-membran elektro biriktirme	[76]
Akustik	Nanotel	Akustik basınç farkı/ akustik olarak tahrik edilen asimetrik sabit sıvı akışı	Kalıp-membran elektro biriktirme	[77]
Işık	Janus Mikromotor	Işığın neden olduğu difüzyoferez	Fiziksel Buhar Biriktirme	[78]

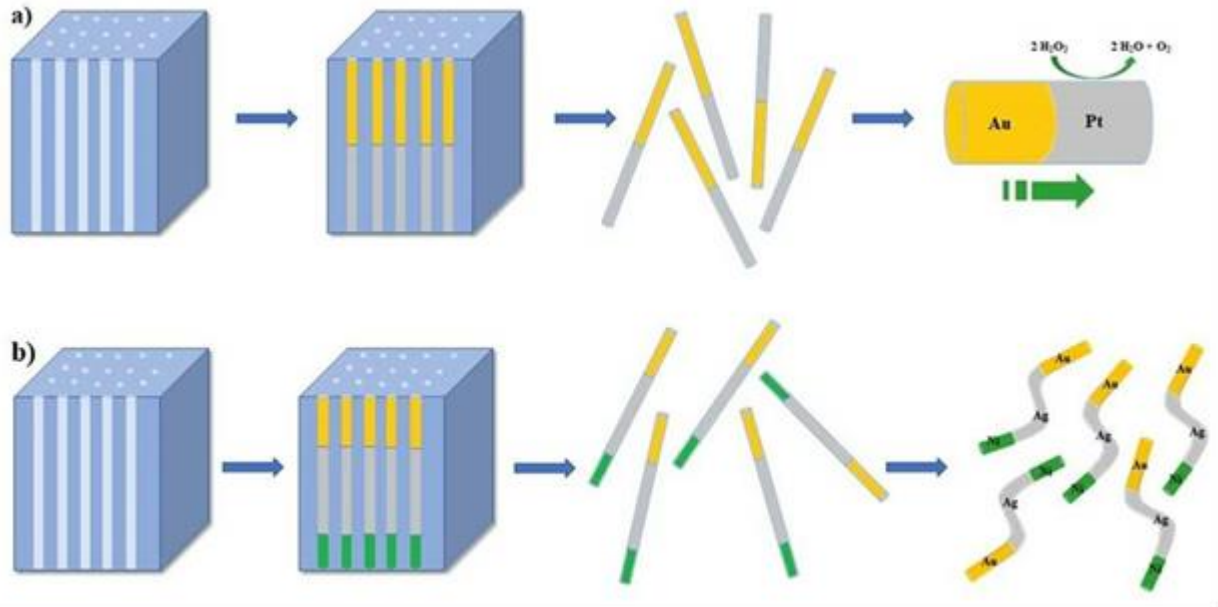
2.5.1. Kalıp-Membran Elektro Biriktirme Nano/Mikromotorların Sentez Yöntemleri (Template-Membrane Electrodeposition)

Elektrokimyasal biriktirme yöntemi, işlemin hızlı ve kontrollü olması, vakum gerektirmemesi, oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmesi, kullanılan cihazların diğer sistemlere kıyasla çok daha ucuz olması ve çevre dostu olması gibi avantajlara sahiptir [79]. Membran şablon destekli elektrodpozisyon, polimerler, metaller, yarı iletkenler ve karbonlar gibi farklı malzemelerden oluşan istenen tüpleri ve telleri sentezlemek için membran gözeneklerini kullanmaya dayalı bir tekniktir [80]. Anodik alüminyum oksit (AAO) ve polikarbonat (PC) gibi ticari polimerik membranlar nanotel dizilerini nispeten kolay ve hızlı bir şekilde büyütmek için sert şablonlar olarak kullanılmaktadır [81]. Elektrokimyasal hücre iki veya üç elektrot ile bu elektrotlar arasındaki iletimi sağlayan bir elektrolitten meydana gelir ve sabit akım ya da voltaj kaynağına bağlıdır [79]. Kalıp-membran elektro biriktirme için üçlü elektrot sistemi kullanılmaktadır [20]. Altın, gümüş ya da platin gibi bir metalin püskürtme yoluyla biriktirilmesi veya şablonların bir tarafında buharlaşma, onları elektriksel olarak iletken forma getirilerek çalışma elektrodu hazırlanır [81]. Hazırlanan iletken membran alüminyum levha

içeren bir teflon kaplama hücreğine yerleştirilir. Çalışma elektrodunun yerleştirildiği üçlü elektrot sistemi düzeneğine Ag/AgCl referans elektrodu ve Pt karşıt elektrodu yerleştirilir. Yapılacak kaplamanın parametreleri belirlenmiş olup yük geçişi ayarlanarak istenilen boyutta nano/mikromotorlar sentezlenir [20].

Nano/mikromotorların sentezi için yaygın kullanılan kalıp-membran elektro biriktirme tekniği tübüler ve tel benzeri nano/mikromotorların üretiminde oldukça yaygındır [82]. Bunun yanı sıra Paxton ve arkadaşları kimyasal tahrikli nanotel sentezi için bu yöntemi kullanmıştır. Paxton ve arkadaşları sentezlenen Au/Pt nanotelin %2-3 H₂O₂ çözeltisindeki eksenleri boyunca Şekil 8a'da verildiği gibi Pt ucu yönündeki otonom hareketini incelemişlerdir [3]. Tahrik mekanizması farklı olmakla birlikte nanotel sentezi için sırasıyla Gao [76] ve Ahmed [77] grup arkadaşları ile birlikte bu teknikten yararlanmışlardır. Gao ve arkadaşları Şekil 8b'de yapısı verilen esnek Au/Ag/Ni nanotel karakterize etmişlerdir [76]. Farklı bir tahrik mekanizması üzerinden ilerleyen Ahmed ve arkadaşları akustik tahrikli bir nanoyüzücü karakterize etmişlerdir. *In vivo* çalışmalarda az verimlilik sağlayan bu tahrik mekanizması üzerine yeni bir yapı önermiş ve esnek bir kuyruğun küçük genlikli salınımıyla hareketi mümkün kılmışlardır [77]. Li ve arkadaşları ise esnek bir gümüş menteşe

ile birbirine bağlanan Au/Ni/Au nanoyüzücü başı aktif kısım iken baş vücudu hareket ettirmek önermişlerdir. Bu balık benzeri nanoyüzücünün için salınır, bu da baş kısmı hareket etmeye iter [83].

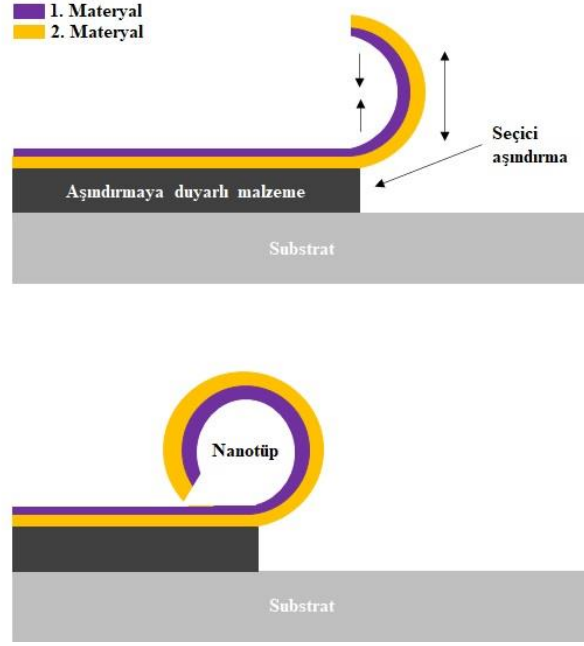


Şekil 8. Kalıp-Membran Elektro Biriktirme tekniği ile sentezlenen farklı tahrik mekanizmalarına sahip nanotellerin şematik gösterimi. a) Kimyasal tahrikli Au/Ni nanotel yapısı[3], b) Manyetik tahrikli esnek Au/Ag/Ni nanotel yapısı (Schematic representation of nanotubes with different propulsion mechanisms synthesized by the Template-Membran Electrodeposition technique. a) Chemical-driven Au/Ni nanotube structure [3], b) Magnetic-driven flexible Au/Ag/Ni nanotube structure)

2.5.2. Rolled-up (Yuvarlama) Sentez Tekniği (Rolled-up Synthesis Technique)

Rolled-up sentez tekniği, üç boyutlu mikrotüp yapıları oluşturmak için tercih edilir. Bunun için nanomembranların içerdiği içsel gerginlik gradyanları kullanılır [72]. Çok sayıda ince metalik tabakanın elektron ışını bombardımanı veya manyetik saçırma tekniği ile kaplanır ve gözden çıkarılacak tabakanın fotorezist malzeme seçilerek kurbanlık bir fotodirenç tabakası üzerine bırakılan

ön gerilimli, multimetalik bir ince film, fotodirençli aşındırarak alt tabaka yüzeyinden salınır. Sonrasında bu tabaka Şekil 9'da şematik olarak gösterildiği gibi kendiliğinden yuvarlanır ve bir mikrotüp oluşturur [20-82-84]. Mei ve arkadaşları bu teknik ile kimyasal tahrikli mikrotübüler jet motorları sentezlemişlerdir. Bir fotorezist kurban tabakası üzerinde Pt/Au/Fe/Ti tabakalarından oluşan sarılmış bir mikrotüp öneren bu çalışmada Pt iç tabakası katalizör görevinde iken, Fe tabakası manyetik rehberlik görevini üstlenmiştir [65].



Şekil 9. Rolled-up tekniği ile sentezlenen nanotüpün şematik gösterimi [84] (Schematic representation of a nanotube synthesized using the rolled-up technique)

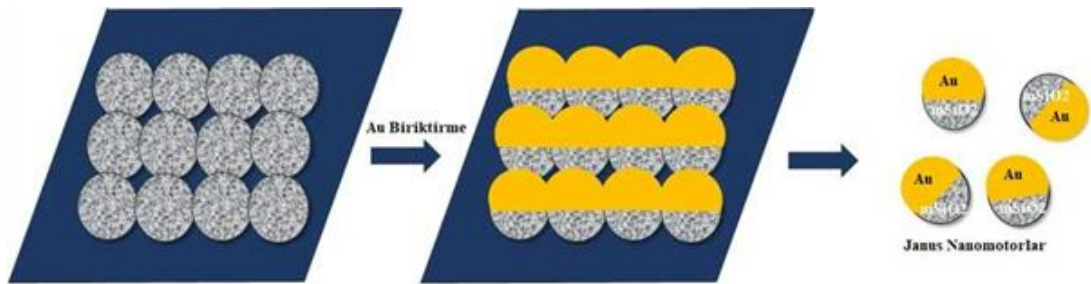
2.5.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)

Fiziksel buhar biriktirme, hedeflenen ince malzeme tabakalarını biriktirmek için vakum ortamında substratın yüzeyi üzerine buharlaştırma yolu ile kaplama tekniğidir [80-85]. Şablon boyutu istenilen ölçüde ayarlanarak nanomotor ya da mikromotor yapıları elde edilebilir. Günümüze kadar nanomotorların hazırlanması için püskürtme ve elektron ışını buharlaştırma olmak üzere iki tür fiziksel buhar biriktirme tekniği kullanılmıştır. Püskürtme tekniği hedefin iyonize gaz olan argon tarafından bombardıman edilmesiyle buhar oluşturmasına dayanır. Elektron ışını buharlaştırması tekniği ise, atomları hedeften gaz fazına buharlaştırmak için bir elektron ışınına dayanır. Daha sonra her iki teknikte de elde edilen buhar fazı substratın yüzeyi üzerine biriktirilir [80].

Janus Nanomotorları (Janus Nanomotors)

Bildirilen nanomotorların çoğu Janus yapılarına sahiptir. Bağlı partikül boyutlarında büyük bir fark olan nanoküre dimerlerini ve yüzeyin bir kısmı aktifleştirilmiş pasif nanopartikülleri içerirler. Kusur ağırlıklı nanomotorlar ile karşılaştırıldığında, bu tür nanomotorlar morfolojik asimetri nedeniyle daha güçlü bir itici güç sergilerler [85].

Xuan ve arkadaşları tarafından NIR tahrikli Janus gözenekli silika nanomotorları (mSiO₂/Au) önerilmiştir. Bu nanomotorlar 10 nm'lik bir Au tabakasının vakumla püskürtülmesi ile sentezlenmiştir. NIR lazerine maruz kalan motor Au yarım küresinin üzerindeki lokalize bir fototermal etki bu nanomotorlar boyunca termal gradyanların oluşmasını sağlar. Şekil 10'da şematize edilen sentez prosedürü ile üretilen kendi kendine termoforez nanomotorların aktif yönlendirmesini mümkün kılar [86].



Şekil 10. mSiO₂/Au Janus nanomotorlarının şematik sentez prosedürü [86] (Schematic synthesis procedure of mSiO₂/Au Janus nanomotors)

2.5.4. Kendi Kendine Kaydırma (Self-Scrolling) Tekniği (Self-Scrolling Technique)

İnce malzeme katmanlarındaki gerginliğe bağlı olarak, düz bir şerit, manyetik itme için istenen yapı olan bir sarmalın içine kayabilir. Nelson ve iş arkadaşları tarafından self-scrolling tekniğine dayalı bir mikro ölçekli sarmal mikromotor prototipi önerilmiştir [87]. Bu çalışmada geleneksel ince film biriktirme yöntemleri kullanılarak düzinelerce mikron büyüklüğünde bir sarmal mikromotorun üretimi tasarlanmıştır. İki veya üç malzeme tabakası biriktirilerek reaktif iyonla dağlama (RIE) ile düz şeritler halinde modellenmiş olup, manyetik tabakaların kimyasal buhar biriktirmesi ve bir kaldırma işlemi ile çalıştırma için bir manyetik kafa yapısı ortaya konmuştur. Yapıdaki dahili gerilimler nedeniyle, şerit desenleri, alt tabakadan serbest bırakıldığında otomatik olarak sarmallar halinde kaydırılmıştır. Sarmal yapıların parametreleri biriktirme koşulları ayarlanarak modüle edilebilir [85].

3. LİTERATÜRDE YER ALAN İLK NANO/MİKROMOTOR ÖRNEKLERİ (FIRST EXAMPLES OF NANO/MICROMOTORS REPORTED IN THE LITERATURE)

Mevcut literatürde yer alan ilk kimyasal güdümlü kendi kendine hareket eden nano/mikromotor 2002 yılında Whiteside ve ekibi tarafından bildirilmiştir [88]. Sonrasında 2004 ve 2005 yıllarında katalitik nanotel nanomotorlar çalışılmıştır. Bu çalışmalar sırası ile Fournier-Bidoz ve Paxton'un ekipleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Fournier-Bidoz ve ekibi tarafından yapılan çalışmada sentezlenen Au-Ni nanotelin H_2O_2 varlığında Ni ile katalizi neticesi hareketi bildirilmiştir [89]. Paxton ve ekibinin çalışmasında ise Au-Pt nanotel sentezlenmiş olup bu katalitik motorun H_2O_2 varlığında hareketi incelenmiştir [3]. İlerleyen zaman diliminde Zhang ve Calvo-Marzal ekipleri ile birlikte harici (manyetik ve elektrik) alan tahrikli sentetik nano/mikromotorlar rapor etmişlerdir [90-91-92]. 2007 ve 2008 yıllarında katalitik Janus partikülleri ve kabarcık tahrikli tübüler mikro motorların ilk çalışmaları yapılmıştır [64-93]. Nanomotorların tedavi amaçlı çalışmaları ilk kez 2010 yılında Kagan ve ekibi tarafından bildirilmiştir [94]. Manyetik ve elektriksel alan dışında bir harici alan yönlendirmesi olan ultrasonik alan tahrikli nano/mikromotorlar ilk kez 2012 yılında Kagan ve Wang'ın ekiplerince gerçekleştirilmiştir [36-95].

2012 yılından günümüze kadar uzanan bu süreçte yapılan pek çok nano/mikromotor çalışması mevcuttur. Güncel literatür incelendiğinde de terapötik amaçlı nano/mikromotorların kullanımı oldukça yaygın olmakla birlikte bunların NIR ile hareketi üzerine yoğunlaşmıştır [96-97-98].

4. KANSER TEŞHİSİNDE NANO/MİKROMOTORLAR (NANO/MICROMOTORS IN CANCER DIAGNOSIS)

Nano/mikromotorların teşhis için kullanılması, hastalığın spesifik semptomları ortaya çıkmadan önce tanımlanmasına olanak sağlayan bir yaklaşımdır. Nanotıp uygulamalarının, *in vitro* tanı ile kıyaslandığında verimliliği artırabileceği düşünülmektedir [99-100]. Bu sebeple, tıbbi çalışmalarda bazı önemli adımların (biyolojik insan sıvılarını veya doku örneklerini toplamak ve hücresel düzeyde çoklu analizler yapmak vb) atlanmasının sağlanabilmesi için nano/mikromotorlar önemli avantajlar sağlamaktadır. Reseptörlerle işlevselleştirilmiş nano/mikromotorlar, işlenmemiş vücut sıvılarında proteinler, nükleik asitler ve kanser hücreleri gibi biyolojik hedefleri tespit etmek ve izole etmek için yeni yollar açan güçlü bağlanma ve taşıma yetenekleri sunmaktadır. Ayrıca nano/mikromotorlar, biyolojik varlıkları bir numune karışımından algılama ve ayırma kapasitesine sahiptir. Nano/mikromotorların bu özelliğine dayanarak antijen-antikör, donör-reseptör, tamamlayıcı oligonükleotidler, spesifik molekülleri veya hücreleri yakalayan nanomotorlar literatürde özellikle kanser teşhis ve tedavisinde kullanılmak üzere önerilmiştir [20].

Jingjing Li ve arkadaşları Au nanoçubuklardan ve periyodik mezogözenekli organo-silika mikrokürelerden (AuNR/PMO JNM'ler) oluşan NIR ile çalışan Janus nanomotorları önermişlerdir. Çalışmanın amacı serum ve hücre ortamında serbest ve kantitatif miRNA-21 tespitini mümkün kılarak kanseri erken evrede teşhis etmektir. Hareket mekanizması NIR altında güçlü kendinden tahrikli termoforetik hareket olan bu nanorotlar miRNA-21 için 18 fmol/L'lik bir tespit sınırı elde etmiş olup, bu sonuç yanal akış test şeridi ile (LFTS) kıyaslandığında 12.22 kat olduğu görülmüştür [101].

5. KANSER TEDAVİSİNDE NANO/ MİKROMOTORLAR (NANO/MICROMOTORS IN CANCER TREATMENT)

Sentetik nanomotorların vücudun daha önce ulaşamamış olan bölgelerine terapötik yükleri taşıma yeteneği nano/mikromotorların kanser tedavisinde uygulama potansiyelini arttırmıştır. Nano/mikromotorların kanser tedavisi üzerine yapılan son çalışmalardan örneklendirmeler yapılacak olursa; Sun ve arkadaşları tarafından hareket mekanizması manyetik, ilaç salımı NIR tahrikli bir nanomotor önerilmiştir. Mikrodalga ısıtma ve kimyasal buhar biriktirme teknikleri ile üretilen heliksel karbon nanobobin rahim ağzı kanseri (HeLa) hücrelerine manyetik olarak yönlendirilir. Kısa süreli (~180 s) 808 nm NIR altında DOX ilaç salımını gerçekleştirmiştir. Bu çalışma ile hedefe yönelik ilaç salımı yanı sıra potansiyel

olarak hassas terapiyi mümkün kıldığını göstermiştir [91].

Wenjun Wang ve arkadaşları kimyasal/NIR çift güçlü CuS/Pt nanomotorlarını önermişlerdir. 4T1 meme kanseri hücreleri üzerinde yapılan çalışmada IR820@CuS/Pt yapısında Janus nanomotorlarının tedavi süreci izlenmiştir. Kansere karşı sinerjistik fototermal (PTT) ve *in vivo* PDT rol oynadığı belirtilen IR820 katkılı nanomotorlar ilaç yüklenmeksizin doğrudan tümör bölgesine uygulanmış olup %96.6'lık bir apoptoz ile sonuçlanmıştır [61].

Ana nano/mikromotor tabanlı ilaç dağıtım sistemleri kanser ve patojenik hücrelerin öldürülmesi, pH-, termal/ışık- veya redoks-tepki davranışı veya hücre bazlı yapılar gibi akıllı biyomateryallerin kombinasyonuna dayanır [6-102].

Tablo 2. Patojenik maddelerin ve kanser hücrelerinin doğrudan yakalanması ve uzaklaştırılması için nano/mikromotorlar (Nano/Micromotors for Direct Capture and Removal of Pathogens and Cancer Cells)

Hedef	Nano/mikromotor Tasarımı	Tahrik Mekanizması	Kaynak
<i>Echerichia Coli</i> (ConA Lektin)	Nanotüp (Au-Ni/PNAL-Pt)	Katalitik	[103]
<i>Escherichia Coli</i> (ConA)	(Au-Ni-Au)	Ultrason	[14]
CTCs (antikor)	(Ti/Fe/Au/Pt Mikrotüp)	Katalitik	[104]
<i>Staphylococcus aureus</i> (RBC ve PCL biyomembranlar)	Au nanotel	Ultrason	[105]
Leukemia cells (HL-60)(aptamer)	MnO ₂ -PEI*/Ni/Au	Katalitik	[106]

PEI *: Polietilenimin

Tablo 3. Patojenik maddelerin ve kanser hücrelerinin doğrudan temas ve öldürülmesi için nano/mikromotorlar (Nano/Micromotors for Direct Contact and Killing of Pathogens and Cancer Cells)

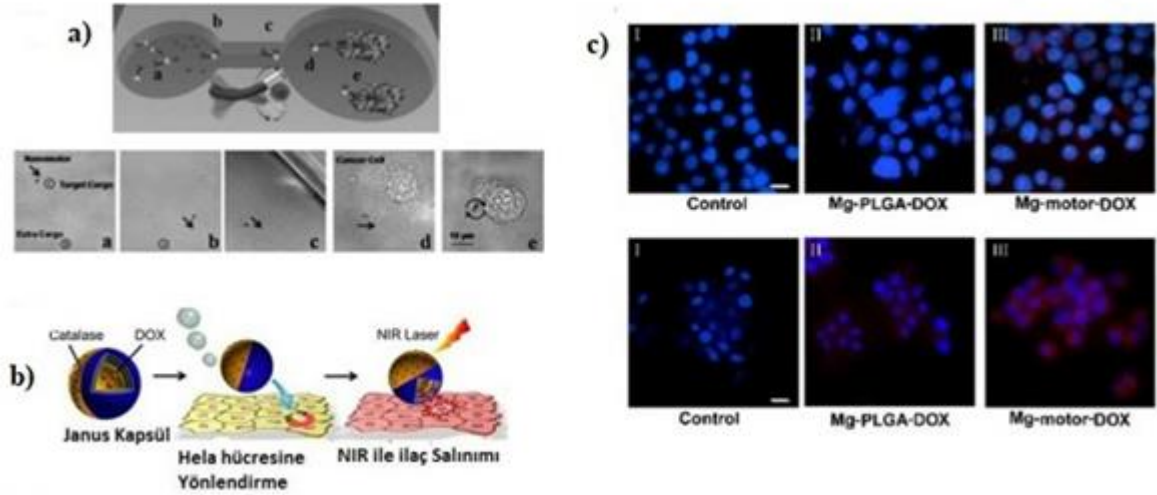
Hedef	Nano/mikromotor Tasarımı	Tahrik Mekanizması	Kaynak
<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylo coccus aureus</i> (Gümüş Nanoparçacıklar)	(Pd/Ni/Ag)	Manyetik	[107]
<i>Escherichia coli</i> (Gümüş Nanoparçacıklar)	(Au-Fe-Au/Mg)	Katalitik (Mg/H ₂ O ₂)	[108]
<i>Escherichia coli</i> , <i>Micrococcus lysodeikticus</i> (Lizozim)	Gözenekli Au nanotel	Ultrason	[109]
HeLa kanser hücreleri (Au-NIR Işık)	[PSS/PAH]5	NIR Işık	[110]

Aktif farmasötik bileşenlerin çözünürlüğünü artıran nano ölçekte geniş özgül yüzey alanının varlığı, ilaç moleküllerinin yüksek biyoyararlanımı ve daha az toksisite profili sağlaması gibi pek çok avantaj

sahiptir [111]. Motorların hedefe yönelik salım yapması için tümör tedavilerinin incelenmesinde yaygın olarak tipik kemoterapötik ilaç olan doksorubisin (DOX), kullanılmaktadır. İlaç taşıma

uygulamasını için nano/mikromotorların kullanımına dair yapılan öncü çalışmalardan biri Kagan ve çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır [94]. Bu öncü araştırmada, ilaç yüklü poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) partiküllerini ve lipozomları alabilen katalitik nanomotorlar araştırılmış ve bu araştırmanın ardından, HeLa hücrelerine

doksorubisin taşınması için yakıtsız (manyetik olarak yönlendirilen) nanomotorlar üzerinde çalışmaya devam etmişlerdir. Çalışmaların sonuçları, nano/mikromotorların ilaç yüklerinin farklı tahrik mekanizmaları yoluyla hedeflenen bölgelere hızlı bir şekilde ulaştırılmasında yeni bir fırsat penceresi sağlayabileceğini göstermiştir [20].



Şekil 11. a) Hücre kültür ortamında manyetik esnek Ni-Ag nanomotoru kullanarak HeLa hücrelerine ilaç uygulanması [112], b) Janus kapsül motorlarının NIR tetiklemeli ilaç salımı [113], c) DOX endositozu ve kanser hücrelerinin terapötik etkinlikleri verilmiştir. Üst sırada HT29 kolon kanseri hücre hattı, alt sıra 4T1 meme kanseri hücre hattına DOX salımı [114]. (a) Drug delivery to HeLa cells using flexible magnetic Ni-Ag nanomotor in cell culture medium [112], b) NIR-triggered drug release from Janus capsule motors [113], c) DOX endocytosis and therapeutic efficacy against cancer cells. Top row represents DOX release to HT29 colon cancer cell line, bottom row represents DOX release to 4T1 breast cancer cell line [114])

6. NANO/MİKROMOTORLARIN *IN VIVO* SINIRLAMALARI (LIMITATIONS OF NANO/MICROMOTORS IN *IN VIVO* APPLICATIONS)

Nano/mikromotorların kanser teşhis ve tedavisinde önemli avantaj sağladığı bilinmektedir. Ancak bu nano/mikro ölçekli yapıların insan vücuduna uyarlanması oldukça karmaşık bir prosedür gerektirmektedir. Nano/mikromotorlar sentez aşamasında polimerler, metaller, oksitler veya enzimler gibi farklı yapılar kullanılarak güçlendirilmektedirler [115]. Bunların yanı sıra H_2O_2 , glikoz, su veya başka herhangi bir biyoyumlu ya da toksik kimyasal ile modifiye edilmesi nano/mikromotora kendi kendine hareket etme kabiliyeti sağlar [116]. İncelenen literatür doğrultusunda kimyasal olarak güçlendirilmiş nano/mikromotorların çok az bir kısmının kan gibi karmaşık bir ortam içerisinde veya hücre içi ortamları içeren bir operasyona uygun olduğu belirtilmiştir. Kan akışında meydana gelen bu sınırlamalara, kanda oluşan baloncuklar örnek verilebilir. Bunun yanı sıra

kimyasal olarak güçlendirilmiş nano/mikromotorlar, biyolojik açıdan değerlendirildiğinde bu koşullar altında zayıf bulunmakla birlikte hız ve yönelim açısından da kontrol edilmesi güçtür. Bu sorunlar sebebi ile kimyasal olarak güçlendirilmiş nano/mikromotorların hedeflenen kanser tedavisi için geliştirilmesi gerekmektedir [117].

Nano/mikromotorların hareket prensibi kimyasal güdümlünün yanı sıra harici alan tahrikli de olabilir. Ve bu harici alan tahrikli nano/mikromotorların da birtakım sorunları mevcuttur. Karışık olan harici bir kurulum neticesinde hareket sağlayan bu motorların dışarıdan sağlanan kaynak gücüne bağlı olmaları, beraberinde birtakım sorunlar meydana getirir. Örneğin; mevcut literatürdeki ultrasonik nano/mikromotorlar incelendiğinde çoğu çalışmanın *in vivo* koşullara uygulanabilmesi güçtür. Zira belirli bir kalınlıktaki bir boşluk içinde hareket eden MHz sabit dalgaları üreten bir akustik kurulum gerektirir [118]. Geçici ses dalgaları yoluyla

akış tabanlı nano/mikromotorların çok yakın zamanda geliştirilmesi bu sorunu büyük ölçüde azaltmış olsa da tamamen çözdüğü söylenemez [119-120-121]. Aynı sorun manyetik tahrikli nano/mikromotorlar için de geçerlidir. Uygulanan harici manyetik alan bireysel olarak yönlenmeyi mümkün kılmadığı gibi ortamdaki bütün nano/mikromotorların toplu halde hareketini sağlar [122-123]. Bu toplu hareket için de tümör mikroçevresi gibi dar alanlar sorun meydana getirir. Zira bu bölgede toplu olarak hareket eden nano/mikromotorlar teoride olması beklendiği gibi tümör bölgesine nüfuz edemeyebilir.

Kimyasal ve harici alan yönlendirmelerinin yanı sıra son yıllarda oldukça tercih edilen bir başka hareket prensibi nano/mikromotorun fototermal olarak yönlendirilmesidir. Fototermal etki, ışığa duyarlı olarak sentezlenmiş nano/mikromotorun asimetric ısınma sebebiyle yer değiştirmesi prensibine dayanır. Bu anlamda yapılan ilk çalışmalar, bir koloidal parçacığın kendi sıcaklık gradyanında hareket etmesi olan kendi kendine termoforez yoluyla veya bir ikili sıvının karıştırılması yoluyla lazer ışınması altında altın kaplı mikrokürelerin otonom itişini göstermiştir [124,125]. Kendi kendine termoforez ilkesi, son zamanlarda *in vitro* polimer mikrotüplere, karbon nanoparçacıklara ve silika nanoparçacıklara güç sağlama amacı ile uygulanmıştır [44-86-126]. *In vivo* çalışmalarda sıkça karşılaşılan silika nanopartiküller, yüksek penetrasyon yeteneğine sahip olmakla birlikte iyi biyouyumluluk sağlarlar [127]. Bu partiküllerin hareketi için de yakın kızılötesi ışık (NIR) kullanılır [55]. Fototermal etki uygulanırken önemli olan motoru harekete geçirebilecek olan gücün aynı zamanda biyouyumlu da olması gerekmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda da genel olarak bu soruna çözüm sunmak adına farklı güç yoğunluklarına sahip NIR ışınması ile nano/mikromotorların hareketi incelenmiştir [60-96-97-98]. NIR uygulamasındaki güncel sorun; motorların karmaşık bir ortamda doğru şekilde yönlendirilebilmesidir. İlerleyen çalışmaların bu soruna da ışık tutması beklenmektedir.

Biyohibrit nano/mikromotorlar bahsedilen sınırlamalara sahip biyouyumlu olmayan nano/mikromotorlara bir çözüm sağlamaktadırlar [128]. Bunlar, herhangi bir beşeri etki olmaksızın çözelti ortamında otonom harekete sahip bakteri, alg, makrofaj ve

spermatozoa gibi canlı mikroorganizmalara modifiye edilmiş olan nano/mikromotorlardır. Otonom harekete sahip bu mikroorganizmaların kullanılması canlı organizmalara özgü algılama, kemotaksis ve sürü kontrolü gibi benzersiz faydalar sağlar. Ancak vücuda dışarıdan bir müdahale ile verilen bu nano/mikromotorlar, güvenlik tehdidi oluşturur ve bağışıklık sistemi ile mücadele etmek durumunda kalabilirler. Bunun yanı sıra seri üretimi de kimyasal ve harici alan tahrikli nano/mikromotorlara kıyasla daha zordur [129].

7. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Nano/mikromotorların sentezi ve uygulaması üzerine yaklaşık 20 yıllık yapılan araştırmalar neticesinde farklı avantajlara sahip pek çok nano/mikromotor üretilmiştir. Ancak hedefe yönelik ilaç salımı çalışmalarında birtakım zorluklar meydana gelmektedir. Bu zorluklar özellikle biyomedikal uygulamalar aşamasında ortaya çıkmaktadır. Bu doğrultuda yapılan *in vivo* çalışmalarda sentez için kullanılan maddenin uygun olmaması nano/mikromotorların biyouyumluluğunu kısıtlamaktadır. Dolayısıyla kullanılan malzemelerde biyolojik parçalanmanın sağlanması için malzemelerin optimizasyonu önemli bir aşamadır.

Bir başka sorun ise kimyasal yakıtlı nano/mikromotorların biyolojik riskleridir. Buna çözüm olarak harici alan etkili nano/mikromotorlar sentezlenmiştir. Sentezlenen bu nano/mikromotorların hareketini sağlamak amacıyla canlı hücreler üzerine negatif etki yapan manyetik alan, NIR ışık gibi etkenler mevcuttur. Bu etkenlerin biyouyumlu aralıkta olmaları sağlanmalıdır. Ancak bütün bu çalışmalar ilerleyen zamanda daha da netlik kazanacaktır. Çünkü günümüzde hala nano/mikromotorların *in vivo* çalışmalarında eksiklikler bulunmaktadır. *In vivo* çalışmalarda eksikler olsa da sağlık alanında nano/mikromotorların kullanılması özellikle kanser teşhis ve tedavisinde büyük önem arz etmektedir. X-ışını kullanılarak yapılan geleneksel teşhis ve tedavi yöntemleri, sağlıklı hücrelere zarar verme riskini de beraberinde getirmektedir. Geleneksel kanser teşhisinde kullanılan yöntemlerde, X-Ray ve/veya CT taramalar ile organlar üzerindeki büyümeler ve değişimler tespit edilir. Sonuca bağlı olarak şüpheli durumlarda biyopsi yapılarak kanser teşhisi netleştirilir. Bu yöntemler erken teşhisi pek mümkün kılmamaktadır ve bu durum genellemeye vurulduğunda kanser vakalarının 2/3'si vaka ölümcül hale geldiğinde ancak teşhisinin mümkün

olduğu görülmüştür. Fakat nanoteknolojinin gelişimiyle çalışmaları hızla devam eden nano/mikromotorların günümüze kadar uygulanan *in vivo* çalışmaları fazla olmamakla birlikte bu alanda umut vaat etmektedir. Nanoteknoloji yardımıyla, tümörler erken dönemde teşhis edilebilir. Teşhis için kullanılan nano/mikromotorların tek bir tümör hücresine özgü basınç gradyanını aşip, tümör hücresine girebilmesi bu konudaki görüntüleme tekniklerinin limitlerini artırmakta ve erken teşhisi mümkün kılmaktadır. Teşhisi sağlanan kanser hücresi üzerine doğrudan tedavi amaçlı uygulanan *in vivo* çalışmaların eksikliği bu noktada kendini belli etmektedir. *In vivo* aşamaya geçilmemiş olsa da yapılan *in vitro* çalışmalarda, kanser tedavisinde kullanılan nano/mikromotorlar tahrik mekanizmasına göre doğrudan kanserli hücreye erişim sağlarken sağlıklı hücreler bundan etkilenmez. Fakat teoride böyle olan bu durum uygulamada tam anlamıyla bir alternatif tedavi yöntemi değildir. Ayrıca günümüzde nano/mikromotorlar kanser tedavisinde kemoterapiye ek bir tedavi yöntemi olarak uygulanmaktadır. İlerleyen zaman diliminde kemoterapiye alternatif bir tedavi yöntemi olarak uygulanması beklenmektedir.

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)

Ayşegül TÜRKER: Literatür araştırması yaparak derlemenin yazımında rol almıştır.

Literature research has contributed to the writing of the review.

Yunus Emre BÜLBÜL: Literatür araştırması yaparak derlemenin yazımı ve kontrolü aşamasında rol almıştır.

Literature research has played a role in the writing and review process of the review.

Ayşegül UYGUN ÖKSÜZ: Literatür araştırması yaparak derlemenin yazımı ve kontrolü aşamasında rol almıştır.

Literature research has played a role in the writing and review process of the review.

Gözde YURDABAK KARACA: Literatür araştırması yaparak derlemenin yazımı ve kontrolü aşamasında rol almıştır.

Literature research has played a role in the writing and review process of the 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] Lv C., Yang Y., Li B., Nano/Micromotors in Active Matter, Micromachines (Basel), 13 (2022) 307.
- [2] Sonntag L., Simmchen J., Magdanz V., Nano-and micromotors designed for cancer therapy, Molecules, 24 (2019) 3410.
- [3] Paxton W.F., Kistler K.C., Olmeda C.C., Sen A., Angelo S.K., Cao Y., Mallouk T.E., Lammert P.E., Crespi V.H., Catalytic nanomotors: Autonomous movement of striped nanorods, J Am Chem Soc., 126 (2004) 13424–13431.
- [4] Wang H., Pumera M., Micro/Nanomachines and Living Biosystems: From Simple Interactions to Microcyborgs, Adv Funct Mater, 28 (2018) 1705421.
- [5] Li J., Rozen I., Wang J., Rocket Science at the Nanoscale, ACS Nano, 10 (2016) 5619–5634.
- [6] Yuan K., Jiang Z., Jurado-Sánchez B., Escarpa A., Nano/Micromotors for Diagnosis and Therapy of Cancer and Infectious Diseases, Chemistry - A European Journal, 26 (2020) 2309–2326.
- [7] Global Health Metrics, Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017, GBD 2017 Causes of Death Collaborators (2018)
- [8] Zugazagoitia J., Guedes C., Ponce S., Ferrer I., Molina-Pinelo S., Paz-Ares L., Current Challenges in Cancer Treatment, Clin Ther. 38 (2016) 1551–1566.
- [9] Siegel R.L., Miller K.D., Wagle N.S., A. Jemal, Cancer statistics, 2023, CA Cancer J Clin. 73 (2023) 17–48.
- [10] Yi X., Zeng W., Wang C., Chen Y., Zheng L., Zhu X., Ke Y., He X., Kuang Y., Huang Q., A step-by-step multiple stimuli-responsive metal-phenolic network prodrug nanoparticles for chemotherapy, Nano Res., 15 (2022) 1205–1212.

- [11] Alekshun M.N., Levy S.B., Molecular Mechanisms of Antibacterial Multidrug Resistance, *Cell*, 128 (2007) 1037–1050.
- [12] Chu G.C., Kimmelman A.C., Hezel A.F., DePinho R.A., Stromal biology of pancreatic cancer, *J Cell Biochem*, 101 (2007) 887–907.
- [13] Yurdabak Karaca G., Kuralay F., Ozaltın K., Eren Demirbüken S., Garıpcan B., Oksuz L., Uygun Oksuz A., Gold–Nickel Nanowires as Nanomotors for Cancer Marker Biodetection and Chemotherapeutic Drug Delivery, 4 (2021) 3377-3388.
- [14] Garcia-Gradilla V., Orozco J., Sattayasamitsathit S., Soto F., Kuralay F., Pourazary A., Katzenberg A., Gao W., Shen Y., Wang J., Functionalized ultrasound-propelled magnetically guided nanomotors: Toward practical biomedical applications, *ACS Nano*, 7 (2013) 9232–9240.
- [15] Lin X., Xu B., Zhu H., Liu J., Solovev A., Mei Y., Requirement and Development of Hydrogel Micromotors towards Biomedical Applications, *Research*, 2020 (2020) 1–15.
- [16] Luo M., Feng Y., Wang T., Guan J., Micro-/Nanorobots at Work in Active Drug Delivery, *Adv Funct Mater*, 28 (2018) 1706100.
- [17] Li T., Wan M., Mao C., Research Progress of Micro/Nanomotors for Cancer Treatment, *Chempluschem*, 85 (2020) 2586–2598.
- [18] Zhang H., Duan W., Liu L., Sen A., Depolymerization-powered autonomous motors using biocompatible fuel, *J Am Chem Soc.*, 135 (2013) 15734–15737.
- [19] Zhang D., Liu S., Guan J., Mou F., “Motile-targeting” drug delivery platforms based on micro/nanorobots for tumor therapy, *Front Bioengineering and Biotechnology*, 10 (2022) 1002171.
- [20] Yurdabak Karaca G., Uygun Öksüz A., Nano/Mikromotorlar ve Biyomedikal Uygulamaları, *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 1 (2020) 61 – 77.
- [21] Mou F., Chen C., Ma H., Yin Y., Wu Q., Guan J., Self-propelled micromotors driven by the magnesium-water reaction and their hemolytic propertiem, *Angewandte Chemie - International Edition*, 52 (2013) 7208–7212.
- [22] Liou G.Y., Storz P., Reactive oxygen species in cancer, *Free Radic Res.*, 44 (2010) 479–496.
- [23] Wan M., Chen H., Wang Q., Niu Q., Xu P., Yu Y., Zhu T., Mao C., Shen J., Bio-inspired nitric-oxide-driven nanomotor, *Nat Commun.*, 10 (2019) 966.
- [24] Chen C., Soto F., Karshalev E., Li J., Wang J., Hybrid Nanovehicles: One Machine, Two Engines, *Adv Funct Mater.*, 29 (2019).
- [25] Tu Y., Peng F., White P.B., Wilson D.A., Redox-Sensitive Stomatocyte Nanomotors: Destruction and Drug Release in the Presence of Glutathione, *Angewandte Chemie.*, 129 (2017) 7728–7732.
- [26] Choi H., Lee G.H., Kim K.S., Hahn S.K., Light-Guided Nanomotor Systems for Autonomous Photothermal Cancer Therapy, *ACS Appl Mater Interfaces.*, 10 (2018) 2338–2346.
- [27] Mou F., Chen C., Zhong Q., Yin Y., Ma H., Guan J., Autonomous motion and temperature-controlled drug delivery of Mg/Pt-poly(n - isopropylacrylamide) janus micromotors driven by simulated body fluid and blood plasma, *ACS Appl Mater Interfaces*, 6 (2014) 9897–9903.
- [28] Xiong K., Xu L., Lin J., Mou F., Guan J., Mg-Based Micromotors with Motion Responsive to Dual Stimuli, *Research*, 2020 (2020) 1–12.
- [29] Mou F., Xie Q., Liu J., Che S., Bahmane L., You M., Guan J., ZnO-based micromotors fueled by CO₂: The first example of self-reorientation-induced biomimetic chemotaxis, *Natl Sci Rev.*, 8 (2021) nwab066.
- [30] Peyer K.E., Zhang L., Nelson B.J., Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications, *Nanoscale*, 5 (2013) 1259–1272.
- [31] Wang B., Kostarelos K., Nelson B.J., Zhang L., Trends in Micro-/Nanorobotics: Materials Development, Actuation, Localization, and System Integration for Biomedical Applications, *Advanced Materials*, 33 (2021) 2002047.
- [32] Karaca G. Y., Kaya H. K., Kuralay F., Oksuz A. U., Chitosan functionalized gold-nickel bimetallic magnetic nanomachines for motion-based deoxyribonucleic acid recognition, *Int J Biol Macromol.* 193 (2021) 370–377.
- [33] Yu Y., Shang L., Gao W., Zhao Z., Wang H., Zhao Y., Microfluidic Lithography of Bioinspired Helical Micromotors, *Angewandte Chemie - International Edition*, 56 (2017) 12127–12131.
- [34] Chen X., Zhou C., Wang W., Colloidal Motors 101: A Beginner’s Guide to Colloidal Motor Research, *Chem Asian J.*, 14 (2019) 2388–2405.
- [35] Li J., Li T., Xu T., Kiristi M., Liu W., Wu Z., Wang J., Magneto-Acoustic Hybrid Nanomotor, *Nano Lett.*, 15 (2015) 4814–4821.
- [36] Wang J., Gao W., Nano/microscale motors: Biomedical opportunities and challenges, *ACS Nano.*, 6 (2012) 5745–5751.
- [37] Soto F., Martin A., Ibsen S., Vaidyanathan M., Garcia-Gradilla V., Levin Y., Escarpa A.,

- Esener S.C., Wang J., Acoustic microcannons: Toward advanced microballistics, *ACS Nano.*, 10 (2016) 1522–1528.
- [38] Fernández-Medina M., Ramos-Docampo M.A., Hovorka O., Salgueiriño V., Städler B., Recent Advances in Nano- and Micromotors, *Adv Funct Mater.*, 30 (2020) 1908283.
- [39] Liu M., Zentgraf T., Liu Y., Bartal G., Zhang X., Light-driven nanoscale plasmonic motors, *Nat Nanotechnol.*, 5 (2010) 570–573.
- [40] Koumura N., Zijlstra R.W.J., Delden R.A., Harada N., Feringa B.L., Light-driven monodirectional molecular rotor, *Nature.*, 401 (1999) 152–155.
- [41] Pacheco M., Jurado-Sánchez B., Escarpa A., Visible-Light-Driven Janus Microvehicles in Biological Media, *Angewandte Chemie - International Edition.*, 58 (2019) 18017–18024.
- [42] Mourran A., Zhang H., Vinokur R., Möller M., Soft Microrobots Employing Nonequilibrium Actuation via Plasmonic Heating, *Advanced Materials*, 29 (2017) 1604825.
- [43] Dreyfus R., Baudry J., Roper M.L., Fermigier M., Stone H.A., Bibette J., Microscopic artificial swimmers, *Nature*, 437 (2005) 862–865.
- [44] Xing Y., Zhou M., Du X., Li X., Li J., Xu T., Zhang X., Hollow mesoporous carbon@Pt Janus nanomotors with dual response of H₂O₂ and near-infrared light for active cargo delivery, *Appl Mater Today*, 17 (2019) 85–91.
- [45] Calvo-Marzal P., Sattayasamitsathit S., Balasubramanian S., Windmiller J.R., Dao C., Wang J., Propulsion of nanowire diodes, *Chemical Communications*, 46 (2010) 1623–1624.
- [46] Guo J., Gallegos J.J., Tom A.R., Fan D., Electric-Field-Guided Precision Manipulation of Catalytic Nanomotors for Cargo Delivery and Powering Nanoelectromechanical Devices, *ACS Nano*, 12 (2018) 1179–1187.
- [47] Williams B.J., Anand S. v., Rajagopalan J., Saif M.T.A., A self-propelled biohybrid swimmer at low Reynolds number, *Nat Commun.*, 5 (2014) 3081.
- [48] Xu B., Han X., Hu Y., Luo Y., Chen C.H., Chen Z., Shi P., A Remotely Controlled Transformable Soft Robot Based on Engineered Cardiac Tissue Construct, *Small*, 15 (2019) 1900006.
- [49] Sun L., Yu Y., Chen Z., Bian F., Ye F., Sun L., Zhao Y., Biohybrid robotics with living cell actuation, *Chem Soc Rev.*, 49 (2020) 4043–4069.
- [50] Xu H., Medina-Sánchez M., Magdanz V., Schwarz L., Hebenstreit F., Schmidt O.G., Sperm-Hybrid Micromotor for Targeted Drug Delivery, *ACS Nano*, 12 (2018) 327–337.
- [51] Esteban-Fernández De Ávila B., Gao W., Karshalev E., Zhang L., Wang J., Cell-Like Micromotors, *Acc Chem Res.*, 51 (2018) 1901–1910.
- [52] Magdanz V., Sanchez S., Schmidt O.G., Development of a sperm-flagella driven microbio-robot, *Advanced Materials*, 25 (2013) 6581–6588.
- [53] Bhuyan T., Singh A.K., Dutta D., Unal A., Ghosh S.S., Bandyopadhyay D., Magnetic Field Guided Chemotaxis of iMushbots for Targeted Anticancer Therapeutics, *ACS Biomater Sci Eng.*, 3 (2017) 1627–1640.
- [54] Ramos Docampo M.A., Wang N., Pendlmayr S., Städler B., Self-Propelled Collagenase-Powered Nano/Micromotors, *ACS Appl Nano Mater.*, 5 (2022) 14622–14629.
- [55] Liu W., Wang W., Dong X., Sun Y., Near-Infrared Light-Powered Janus Nanomotor Significantly Facilitates Inhibition of Amyloid- β Fibrillogenesis, *ACS Appl Mater Interfaces.*, 12 (2020) 12618–12628.
- [56] Venugopalan P.L., Ghosh A., Investigating the Dynamics of the Magnetic Micromotors in Human Blood, *Langmuir.*, 37 (2021) 289–296.
- [57] Xu P., Yu Y., Li T., Chen H., Wang Q., Wang M., Wan M., Mao C., Near-infrared-driven fluorescent nanomotors for detection of circulating tumor cells in whole blood, *Anal Chim Acta.*, 1129 (2020) 60–68.
- [58] Karimi M.R., Khoe S., Shaghghi B., Smart transformation of bowl shape chitosan nanomotors to disc shape in simulated biological media and consequent controlled velocity, *J Drug Deliv Sci Technol.*, 80 (2023) 104096.
- [59] Xing Y., Zhou M., Liu X., Qiao M., Zhou L., Xu T., Zhang X., Du X., Bioinspired Jellyfish-like Carbon/Manganese nanomotors with H₂O₂ and NIR light Dual-propulsion for enhanced tumor penetration and chemodynamic therapy, *Chemical Engineering Journal.*, 461 (2023) 142142.
- [60] Xing Y., Xiu J., Zhou M., Xu T., Zhang M., Li H., Li X., Du X., Ma T., Zhang X., Copper Single-Atom Jellyfish-like Nanomotors for Enhanced Tumor Penetration and Nanocatalytic Therapy, *ACS Nano.*, (2023) 142142.
- [61] Wang W., Ma E., Tao P., Zhou X., Xing Y., Chen L., Zhang Y., Li J., Xu K., Wang H., Zheng S., Chemical-NIR dual-powered CuS/Pt nanomotors for tumor hypoxia modulation, deep tumor penetration and augmented synergistic phototherapy, *J Mater Sci Technol.*, 148 (2023) 171–185.

- [62] Li J., Huang G., Ye M., Li M., Liu R., Mei Y., Dynamics of catalytic tubular microjet engines: Dependence on geometry and chemical environment, *Nanoscale.*, 3 (2011) 5083–5089.
- [63] Magdanz V., Guix M., Schmidt O.G., Tubular micromotors: from microjets to spermotors, *Robotics Biomim.*, 1 (2014) 11.
- [64] Mei Y., Huang G., Solovev A.A., Ureña E.B., Mönch I., Ding F., Reindl T., Fu R.K.Y., Chu P.K., Schmidt O.G., Versatile approach for integrative and functionalized tubes by strain engineering of nanomembranes on polymers, *Advanced Materials.*, 20 (2008) 4085–4090.
- [65] Solovev A.A., Mei Y., Ureña E.B., Huang G., Schmidt O.G., Catalytic microtubular jet engines self-propelled by accumulated gas bubbles, *Small*, 5 (2009) 1688–1692.
- [66] Sanchez S., Solovev A.A., Mei Y., Schmidt O.G., Dynamics of biocatalytic microengines mediated by variable friction control, *J Am Chem Soc.*, 132 (2010) 13144–13145.
- [67] Gennes P., *Soft Matter (Nobel Lecture)*, *Angewandte Chemie International Edition in English.*, 31 (1992) 842–845.
- [68] Lattuada M., Hatton T.A., Synthesis, properties and applications of Janus nanoparticles, *Nano Today.*, 6 (2011) 286–308.
- [69] Li X., Chen L., Cui D., Jiang W., Han L., Niu N., Preparation and application of Janus nanoparticles: Recent development and prospects, *Coord Chem Rev.*, 454 (2022) 214318.
- [70] Wei J., Liu Y., Li Y., Zhang Z., Meng J., Xie S., Li X., Photothermal Propelling and Pyroelectric Potential-Promoted Cell Internalization of Janus Nanoparticles and Pyroelectrodynamical Tumor Therapy, *Adv Healthc Mater.*, (2023) 2300338.
- [71] Eren Demirbukan S., Yurdabak Karaca G., Kaya H. K., Oksuz L., Garipcan B., Uygun Oksuz A., Kuralay F., Paclitaxel-conjugated phenylboronic acid-enriched catalytic robots as smart drug delivery systems, *Materials Today Chemistry*, 26 (2022) 101172.
- [72] Mei Y., Solovev A.A., Sanchez S., Schmidt O.G., Rolled-up nanotech on polymers: From basic perception to self-propelled catalytic microengines, *Chem Soc Rev.*, 40 (2011) 2109–2119.
- [73] Dong R., Zhang Q., Gao W., Pei A., Ren B., Highly efficient light-driven TiO₂-Au Janus Micromotors, *ACS Nano*, 10 (2016) 839–844.
- [74] Gao W., Pei A., Wang J., Water-driven micromotors, *ACS Nano*, 6 (2012) 8432–8438.
- [75] Li J., Li T., Xu T., Kiristi M., Liu W., Wu Z., Wang J., Magneto-Acoustic Hybrid Nanomotor, *Nano Lett.*, 15 (2015) 4814–4821.
- [76] Gao W., Sattayasamitsathit S., Manesh K.M., Weihs D., Wang J., Magnetically powered flexible metal nanowire motors, *J Am Chem Soc.*, 132 (2010) 14403–14405.
- [77] Ahmed D., Baasch T., Jang B., Pane S., Dual J., Nelson B.J., Artificial Swimmers Propelled by Acoustically Activated Flagella, *Nano Lett.*, 16 (2016) 4968–4974.
- [78] Yuan K., Bujalance-Fernández J., Jurado-Sánchez B., Escarpa A., Light-driven nanomotors and micromotors: envisioning new analytical possibilities for bio-sensing, *Microchimica Acta.*, (2020) 187-581.
- [79] Çetinel A. (2017). Gözenekli Silikon Kalıpların Elde Edilmesi, Elektrodepozisyon Yöntemi İle Gözenekli Silikon Kalıplar Üzerinde Metalik Co Ve Ag Nanoyapıların Büyütülmesi, Yapısal Ve Optiksel Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [80] Wang H., Pumera M., Fabrication of micro/nanoscale motors, *Chem Rev.*, 115 (2015) 8704–8735.
- [81] Puigmartí-Luis J., Sevim S., Pellicer E., Jang B., Chatzipirpiridis G., Chen X.Z., Nelson B.J., Pané S., Magnetically and chemically propelled nanowire-based swimmers, in: *Magnetic Nano- and Microwires: Design, Synthesis, Properties and Applications*, Elsevier, (2020) 777–799.
- [82] Shen H., Cai S., Wang Z., Ge Z., Yang W., Magnetically driven microrobots: Recent progress and future development, *Mater Des.*, 227 (2023) 111735.
- [83] Li J., Sattayasamitsathit S., Dong R., Gao W., Tam R., Feng X., Ai S., Wang J., Template electrosynthesis of tailored-made helical nanoswimmers, *Nanoscale*, 6 (2014) 9415–9420.
- [84] Schmidt O. G., Eberl K., Thin solid films roll up into nanotubes, *Nature Research Akademies*, 410 (2001) 168.
- [85] Wang L., Hao X., Gao Z., Yang Z., Long Y., Luo M., Guan J., Artificial nanomotors: Fabrication, locomotion characterization, motion manipulation, and biomedical applications, *Interdisciplinary Materials*, 1 (2022) 256–280.
- [86] Xuan M., Wu Z., Shao J., Dai L., Si T., He Q., Near Infrared Light-Powered Janus Mesoporous Silica Nanoparticle Motors, *J Am Chem Soc.*, 138 (2016) 6492–6497.
- [87] Bell D.J., Leutenegger S., Hammar M.K., Dong L., Nelson B.J., Flagella-Like Propulsion for Microrobots Using a Nanocoil and a Rotating Electromagnetic Field, 2007 IEEE International

- Conference on Robotics and Automation (2007),1128-1133.
- [88] Ismagilov R.F., Schwartz A., Bowden N., Whitesides G.M., Autonomous movement and self-assembly, *Angewandte Chemie - International Edition*. 41 (2002) 652–654.
- [89] Fournier-Bidoz S., Arsenault A.C., Manners I., Ozin G.A., Synthetic self-propelled nanorotors, *Chemical Communications*. (2005) 441–443.
- [90] Zhang L., Abbott J.J., Dong L., Kratochvil B.E., Bell D., Nelson B.J., Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control, *Appl Phys Lett*. 94 (2009) 064107.
- [91] Zhang L., Abbott J.J., Dong L., Peyer K.E., Kratochvil B.E., Zhang H., Bergeles C., Nelson B.J., Characterizing the swimming properties of artificial bacterial flagella, *Nano Lett*. 9 (2009) 3663–3667.
- [92] Calvo-Marzal P., Manesh K.M., Kagan D., Balasubramanian S., Cardona M., Flechsig G.U., Posner J., Wang J., Electrochemically-triggered motion of catalytic nanomotors, *Chemical Communications*. (2009) 4509–4511.
- [93] Howse J.R., Jones R.A.L., Ryan A.J., Gough T., Vafabakhsh R., Golestanian R., Self-Motile Colloidal Particles: From Directed Propulsion to Random Walk, *Phys Rev Lett*. 99 (2007) 048102.
- [94] Kagan D., Laocharoensuk R., Zimmerman M., Clawson C., Balasubramanian S., Kang D., Bishop D., Sattayasamitsathit S., Zhang L., Wang J., Rapid delivery of drug carriers propelled and navigated by catalytic nanoshuttles, *Small*, 6 (2010) 2741–2747.
- [95] Kagan D., Benchimol M.J., Claussen J.C., Chuluun-Erdene E., Esener S., Wang J., Acoustic droplet vaporization and propulsion of perfluorocarbon-loaded microbullets for targeted tissue penetration and deformation, *Angewandte Chemie - International Edition*. 51 (2012) 7519–7522.
- [96] Zhang J., Zhang K., Hao Y., Yang H., Wang J., Zhang Y., Zhao W., Ma S., Mao C., Polydopamine nanomotors loaded indocyanine green and ferric ion for photothermal and photodynamic synergistic therapy of tumor, *J Colloid Interface Sci*. 633 (2023) 679–690.
- [97] Zhang Y., Zhang K., Yang H., Hao Y., Zhang J., Zhao W., Zhang S., Ma S., Mao C., Highly Penetrable Drug-Loaded Nanomotors for Photothermal-Enhanced Ferroptosis Treatment of Tumor, *ACS Appl Mater Interfaces*. 15 (2023) 14099–14110.
- [98] Guo M., Ling J., Xu X., Ouyang X., Delivery of Doxorubicin by Ferric Ion-Modified Mesoporous Polydopamine Nanoparticles and Anticancer Activity against HCT-116 Cells *In vitro*, *Int J Mol Sci*. 24 (2023) 6854.
- [99] Dutta D., Sailapu S.K., Biomedical Applications of Nanobots, in: *Intelligent Nanomaterials for Drug Delivery Applications*, Elsevier, (2020) 179–195.
- [100] Liu L., Gao J., Wilson D.A., Tu Y., Peng F., Fuel-Free Micro-/Nanomotors as Intelligent Therapeutic Agents, *Chem Asian J*., 14 (2019) 2325–2335.
- [101] Chen M., Ma E., Xing Y., Xu H., Chen L., Wang Y., Zhang Y., Li J., Wang H., Zheng S., Dual-Modal Lateral Flow Test Strip Assisted by Near-Infrared-Powered Nanomotors for Direct Quantitative Detection of Circulating MicroRNA Biomarkers from Serum, *ACS Sens*., 8 (2023) 757–766.
- [102] Yuan K., Bujalance-Fernández J., Jurado-Sánchez B., Escarpa A., Light-driven nanomotors and micromotors: envisioning new analytical possibilities for bio-sensing, *Microchimica Acta*, (2020) 187-581.
- [103] Campuzano S., Orozco J., Kagan D., Guix M., Gao W., Sattayasamitsathit S., Claussen J.C., Merkoçi A., Wang J., Bacterial isolation by lectin-modified microengines, *Nano Lett*., 12 (2012) 396–401.
- [104] Balasubramanian S., Kagan D., Jack Hu C.-M., Campuzano S., Lobo-Castañón M.J., Lim N., Kang D.Y., Zimmerman M., Zhang L., Wang J., Micromachine-Enabled Capture and Isolation of Cancer Cells in Complex Media, *Angewandte Chemie*., 123 (2011) 4247–4250.
- [105] Esteban-Fernández De Ávila B., Angsantikul P., Ramírez-Herrera D.E., Soto F., Teymourian H., Dehaini D., Chen Y., Zhang L., Wang J., Hybrid biomembrane-functionalized nanorobots for concurrent removal of pathogenic bacteria and toxins, *Medical Robots*, 3 (2018) 18.
- [106] Xu Y., Wang H., Luan C., Liu Y., Chen B., Zhao Y., Aptamer-based hydrogel barcodes for the capture and detection of multiple types of pathogenic bacteria, *Biosens Bioelectron*, 100 (2018) 404–410.
- [107] Hoop M., Shen Y., Chen X.Z., Mushtaq F., Iuliano L.M., Sakar M.S., Petruska A., Loessner M.J., Nelson B.J., Pané S., Magnetically Driven Silver-Coated Nanocoils for Efficient Bacterial Contact Killing, *Adv Funct Mater*., 26 (2016) 1063–1069.
- [108] Vilela D., Stanton M.M., Parmar J., Sánchez S., Microbots Decorated with Silver Nanoparticles Kill Bacteria in Aqueous Media, *ACS Appl Mater Interfaces*., 9 (2017) 22093–22100.

- [109] Kiristi M., Singh V. v., Esteban-Fernández De Ávila B., Uygun M., Soto F., Aktaş Uygun D., Wang J., Lysozyme-Based Antibacterial Nanomotors, *ACS Nano*, 9 (2015) 9252–9259.
- [110] Wu Y., Si T., Shao J., Wu Z., He Q., Near-infrared light-driven Janus capsule motors: Fabrication, propulsion, and simulation, *Nano Res.*, 9 (2016) 3747–3756.
- [111] Gao W., Ávila B.E.F., Zhang L., Wang J., Targeting and isolation of cancer cells using micro/nanomotors, *Adv Drug Deliv Rev.*, 125 (2018) 94–101.
- [112] Gao W., Kagan D., Pak O.S., Clawson C., Campuzano S., Chuluun-Erdene E., Shipton E., Fullerton E.E., Zhang L., Lauga E., Wang J., Cargo-towing fuel-free magnetic nanoswimmers for targeted drug delivery, *Small*, 8 (2012) 460–467.
- [113] Wu Y., Lin X., Wu Z., Möhwald H., He Q., Self-propelled polymer multilayer janus capsules for effective drug delivery and light-triggered release, *ACS Appl Mater Interfaces.*, 6 (2014) 10476–10481.
- [114] Liu K., Ou J., Wang S., Gao J., Liu L., Ye Y., Wilson D.A., Hu Y., Peng F., Tu Y., Magnesium-based micromotors for enhanced active and synergistic hydrogen chemotherapy, *Appl Mater Today*, 20 (2020) 100694.
- [115] Ma X., Hortelão A.C., Patiño T., Sánchez S., Enzyme Catalysis to Power Micro/Nanomachines, *ACS Nano*. 10 (2016) 9111–9122.
- [116] Moran J.L., Posner J.D., Phoretic Self-Propulsion, *Annu Rev Fluid Mech.* 49 (2017) 511–540.
- [117] Wang W., Zhou C., A Journey of Nanomotors for Targeted Cancer Therapy: Principles, Challenges, and a Critical Review of the State-of-the-Art, *Adv Healthc Mater.* 10 (2021) 2001236.
- [118] Wang W., Castro L.A., Hoyos M., Mallouk T.E., Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound, *ACS Nano*. 6 (2012) 6122–6132.
- [119] Aghakhani A., Yasa O., Wrede P., Sitti M., Acoustically powered surface-slipping mobile microrobots, *National Acad Sciences* 117 (2020) 3469–3477
- [120] Ren L., Nama N., McNeill J.M., Soto F., Yan Z., Liu W., Wang W., Wang J., Mallouk T.E., 3D steerable, acoustically powered microswimmers for single-particle manipulation, 5 (2019) eaax3084 (1-10).
- [121] McNeill J.M., Nama N., Braxton J.M., Mallouk T.E., Wafer-Scale Fabrication of Micro- To Nanoscale Bubble Swimmers and Their Fast Autonomous Propulsion by Ultrasound, *ACS Nano*. 14 (2020) 7520–7528.
- [122] Li Z., Zhang H., Wang D., Gao C., Sun M., Wu Z., He Q., Reconfigurable Assembly of Active Liquid Metal Colloidal Cluster, *Angewandte Chemie*. 132 (2020) 20056–20060.
- [123] Yan X., Zhou Q., Vincent M., Deng Y., Yu J., Xu J., Xu T., Tang T., Bian L., Wang Y.-X.J., Kostarelos K., Zhang L., Multifunctional biohybrid magnetite microrobots for imaging-guided therapy, eaaq1155 2017.
- [124] Jiang H.R., Yoshinaga N., Sano M., Active motion of a Janus particle by self-thermophoresis in a defocused laser beam, *Phys Rev Lett.* 105 (2010).
- [125] Buttinoni I., Volpe G., Kümmel F., Volpe G., Bechinger C., Active Brownian Motion Tunable by Light, (2011).
- [126] Wu Z., Si T., Gao W., Lin X., Wang J., He Q., Superfast Near-Infrared Light-Driven Polymer Multilayer Rockets, *Small*. 12 (2016) 577–582.
- [127] Zhou H., Yuan Y., Wang Z., Ren Z., Hu M., Lu J.K., Gao H., Pan C., Zhao W., Zhu B., Co-delivery of doxorubicin and quercetin by Janus hollow silica nanomotors for overcoming multidrug resistance in breast MCF-7/Adr cells, *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 658 (2023) 130654.
- [128] Wei F., Yin C., Zheng J., Zhan Z., Yao L., Rise of cyborg microrobot: Different story for different configuration, *IET Nanobiotechnol.* 13 (2019) 651–664.
- [129] Buss N., Yasa O., Alapan Y., Akolpoglu M.B., Sitti M., Nanoerythrocyte-functionalized biohybrid microswimmers, *APL Bioeng.* 4 (2020).

İkinci El Otomotiv Sektöründe Kullanılan Şasi Dinamometrelerinin Ölçüm Doğruluklarının Araştırılması

İbrahim YAVUZ¹ , Turan Alp ARSLAN^{1*} , Hüseyin BAYRAKÇEKEN¹ , İbrahim MUTLU¹ , Faruk Emre AYSAL² 

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/05/2023
Düzeltilme: 09/06/2023
Kabul: 25/06/2023

Anahtar Kelimeler

Şasi Dinamometresi
Taşıt Testi
Ölçüm Doğruluğu

Article Info

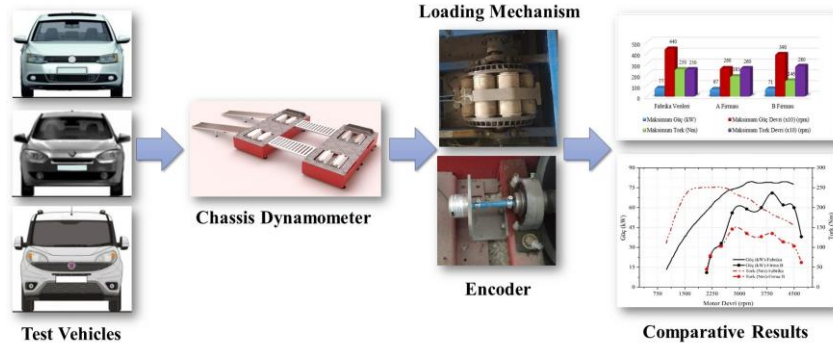
Research article
Received: 04/05/2023
Revision: 09/06/2023
Accepted: 25/06/2023

Keywords

Chassis Dynamometer
Vehicle Testing
Measurement Accuracy

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, piyasada kullanılan şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının araştırılması için üç farklı taşıt, iki farklı oto ekspertiz firmasında test edilmiştir. Firmalara ait test sonuçları kendi arasında ve fabrika verileri ile karşılaştırıldığında güç-tork eğrileri, maksimum güç-tork değerleri ve bu değerlerin oluştuğu motor devirlerinde önemli ölçüde sapmalar oluştuğu tespit edilmiştir. / In this study, three different vehicles were tested in two different auto expertise companies to investigate the measurement accuracy of chassis dynamometers used in the market. When the test results of the companies are compared among themselves and with the factory data, it has been determined that there are serious deviations in the power-torque curves, maximum power-torque values and engine speeds where these values occur.



Şekil A.: Şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının araştırılması / Figure A: Investigation of measurement accuracies of chassis dynamometers

Önemli noktalar (Highlights)

- Şasi dinamometreleri ve ölçüm yöntemleri açıklanmıştır. / Chassis dynamometers and measurement methods are explained.
- Üç farklı taşıt, iki farklı firmada test edilmiştir. / Three different vehicles were tested in two different companies.
- Test sonuçları karşılaştırılarak sapmalar ve bu sapmaların nedenleri tespit edilmiştir. / By comparing the test results, the deviations and the reasons for these deviations were determined.

Amaç (Aim): Gerçekleştirilen çalışma ile ikinci el otomotiv sektöründeki şasi dinamometre testleri ile alakalı yanlış bilgilerin düzeltilmesi ve literatürdeki eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır. / The aim of the study is to correct the wrong information about chassis dynamometer tests in the used automotive sector and to eliminate the deficiency in the literature.

Özgünlük (Originality): Literatür incelendiğinde, bu çalışmada olduğu gibi şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının detaylı olarak araştırıldığı bir çalışma görülmektedir. / When the literature examined, there is no study in which the measurement accuracies of chassis dynamometers are investigated in detail, as in this study.

Bulgular (Results): Ekspertiz firmalarına ait test sonuçları, güç-tork eğrilerinin, maksimum güç ve tork değerlerinin ve bu değerlerin ortaya çıktığı motor devirlerinin fabrika verileri ile büyük oranda uyumsuz olduğunu göstermektedir. / The test results of the expertise companies show that the power-torque curves, maximum power and torque values and the engine speeds at which these values occur are highly inconsistent with the factory data.

Sonuç (Conclusion): Şasi dinamometrelerinin amaca uygun özellikleri, kalitesi ve kalibrasyonunun yanı sıra standartlaşmış doğru ölçüm yöntemi ve operatörün uzmanlığı test sonuçlarının doğruluğunda büyük rol sahibidir. / The fit-for-purpose features, quality and calibration of chassis dynamometers, as well as the standardized accurate measurement method and operator's expertise, play a major role in the accuracy of test results.



İkinci El Otomotiv Sektöründe Kullanılan Şasi Dinamometrelerinin Ölçüm Doğruluklarının Araştırılması

İbrahim YAVUZ¹ , Turan Alp ARSLAN^{1*} , Hüseyin BAYRAKÇEKEN¹ , İbrahim MUTLU¹ , Faruk Emre AYSAL² 

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/05/2023
Düzeltilme: 09/06/2023
Kabul: 25/06/2023

Anahtar Kelimeler

Şasi Dinamometresi
Taşıt Testi
Ölçüm Doğruluğu

Öz

Şasi dinamometreleri motor, güç aktarma organları ve şasi bileşenlerinin test edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Taşıt tipi, boyutları ve ağırlığı gibi temel faktörlerin yanı sıra test cihazı yapısı, yazılımı ve ölçüm yöntemlerine göre sistem üzerinde farklı parametreler incelenebilmektedir. Test sistemi üzerinde kullanılan ekipman ve tasarım yapısına bağlı olarak ölçüm hassasiyeti değişmektedir. Günümüzde ikinci el araç kontrollerinde oto ekspertiz firmaları tarafından yaygın olarak gerçekleştirilen şasi dinamometre testlerinin doğruluğu ve güvenilirliği bir tartışma konusudur. Bu çalışmada, piyasada kullanılan şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının araştırılması için üç farklı taşıt, iki farklı oto ekspertiz firmasında test edilmiştir. Testlerde Common Rail yakıt enjeksiyonuna sahip, turboşarjlı, Euro 5 emisyon normlarına uygun dizel motora ve manuel vites kutusuna sahip taşıtlar kullanılmıştır. Şasi dinamometrelerinde gerçekleştirilen tüm testlerde belirlenen standart adımlar izlenmiş olup testler basınç ve sıcaklık kaynaklı sapmaların önlenmesi için aynı lokasyondaki firmalarda gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında taşıtlara ait maksimum güç ve maksimum güç devri, maksimum tork ve maksimum tork devri, ayrıca bu değerlerin fabrika verilerinden sapma miktarları elde edilmiştir. Firmalara ait test sonuçları kendi arasında ve fabrika verileri ile karşılaştırıldığında güç-tork eğrileri, maksimum güç-tork değerleri ve bu değerlerin oluştuğu motor devirlerinde önemli ölçüde sapmalar oluştuğu tespit edilmiştir.

Investigation of Measurement Accuracy of Chassis Dynamometers Used in Used Automotive Sector

Article Info

Research article
Received: 04/05/2023
Revision: 09/06/2023
Accepted: 25/06/2023

Keywords

Chassis Dynamometer
Vehicle Testing
Measurement Accuracy

Abstract

Chassis dynamometers are used to test engine, powertrain and chassis components. In addition to basic factors such as vehicle type, dimensions and weight, different parameters can be examined on the system depending on the test device structure, software and measurement methods. Measurement accuracy varies depending on the equipment and design structure used on the test system. Today, the accuracy and reliability of chassis dynamometer tests, which are commonly performed by auto expertise companies in used vehicle controls, are a matter of debate. In this study, three different vehicles were tested in two different auto expertise companies to investigate the measurement accuracy of chassis dynamometers used in the market. Vehicles with common rail fuel injection, turbocharged, diesel engine conforming to Euro 5 emission norms and manual gearbox were used in the tests. Standard steps were followed in all tests performed on chassis dynamometers, and tests were carried out in companies located in the same location to prevent deviations due to pressure and temperature. In the test results, the maximum power and maximum power engine speed, maximum torque and maximum torque engine speed of the vehicles, as well as the deviations of these values from the factory data were obtained. When the test results of the companies are compared among themselves and with the factory data, it has been determined that there are serious deviations in the power-torque curves, maximum power-torque values and engine speeds where these values occur.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişten bugüne otomotiv teknolojilerindeki gerçekleşen ilerlemeler yüksek performans ve kalite gereksinimlerini beraberinde getirmektedir. Ayrıca

gelişmiş ülkelerin ortaya koyduğu yönetmelikler ve regülasyonlar bu gereksinimleri arttırmakla birlikte karşılanmalarını da zorunlu kılmaktadır. Otomotiv üreticileri ve araştırmacılar hızlı gelişen teknoloji, değişen sektör trendleri, artan müşteri beklentileri

ve katılan regülasyonlara uyum sağlamak için çalışmalarını sürdürmektedir. Otomotiv teknolojisinin bu hızlı gelişimindeki en büyük etmenlerden biri de taşıt testleridir. Günümüzde otomotiv endüstrisinde araştırma, geliştirme, üretim ve satış sonrası uygulamalar ile taşıt testleri birbirinden bağımsız olarak düşünülemez bir hal almıştır [1,2]. Taşıtların, kavramsal tasarım aşamasından satış sonrası hizmetlere kadar tüm süreçlerde belirlenen kriterlere uygunluğu gelişmiş test sistemleri ile doğrulanmaktadır [3]. Geliştirme aşamasındaki taşıtlar, gelişmiş test sistemleri ile yüksek rakım değerleri, zorlu tırmanış koşulları, farklı basınç, sıcaklık ve nem seviyeleri gibi zorlu çevre şartlarında ve çeşitli senaryolarda testlere tabi tutulmaktadır [4,5]. Gelişmiş test sistemlerinde gerçek yol ve hava koşulları ile bir benzetim ortamı kurularak birçok parametre ölçülebilmektedir. Yapılan testler ile araştırma, geliştirme ve kalite kontrol uygulamaları gerçekleştirilmekte, taşıtlarda hedeflenen değişikliklerin sayısal sonuçlar ile izlenmesi kolaylaşmaktadır. Taşıtların laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testleri ile ölçme ve doğrulama süreci de hızlanmaktadır.

Motor, güç aktarma organları ve şasi bileşenlerinin kara yoluna çıkmadan test edilmesini sağlayan şasi dinamometreleri ise taşıt test sistemleri arasında büyük bir öneme sahiptir. Bu ekipman, dayanıklılık, yakıt tüketimi, emisyon, motor performansı, verimlilik ölçümlerinin yanı sıra standart döngülerin ve dış koşulların benzetimleri gibi analizlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır [6,7]. Ayrıca bu platformlar, gerçek koşulları simüle edebildiği ve bir bilgisayar tarafından kontrol edilebildiğinden, otomotiv endüstrisi tarafından yeni teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılan güvenilir ve kontrollü deneysel koşullar sunmaktadır [8]. Şasi dinamometreleri temelde farklı sürüş çevrimlerine göre tekerleğe uygulanan direnç kuvvetlerinin ve yol koşullarının simüle edilebilmesine olanak sağlamaktadır [9,10]. Özel pistlerde gerçekleştirilecek olan testlere oranla oldukça düşük maliyetli olan bu yöntem trafik ve hava koşullarından, sıcaklık farklarından ve tekrarlanması zor güzergâhlardan kaynaklanacak olumsuzlukları da önlemektedir [11,12]. Ayrıca tek bir standart cihaz ile çok çeşitli araç yapılarının testleri gerçekleştirilebilmektedir. Şasi dinamometreleri ile yol testlerinin aksine tekrarlanabilir, hızlı ve düşük maliyetli testler yürütmek mümkündür. Bu testler ile taşıt sistem parametrelerinin yanı sıra değişen dış koşullar akıcı bir şekilde test edilerek trafik, yol ve sürüş davranışlarına dair optimizasyonlar gerçekleştirilebilmektedir [13]. Ayrıca iklimatik oda

tasarımları ile ortam sıcaklığından bağımsız olarak iklim faktörü de testlere dahil edilebilmektedir.

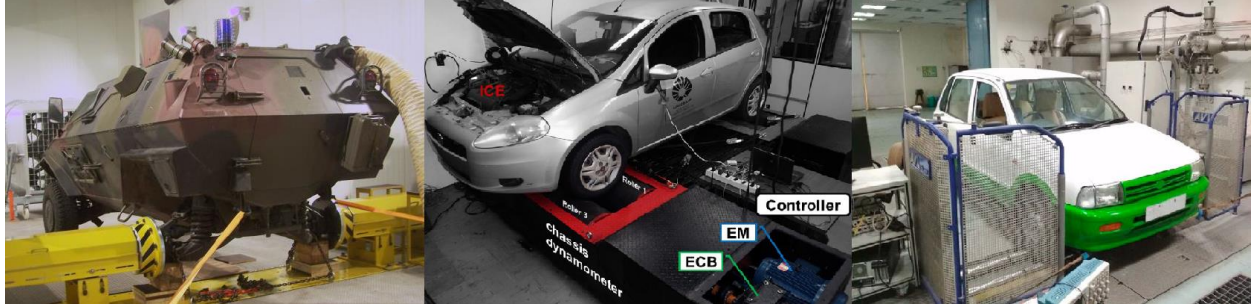
Şasi dinamometreleri ülkemizde fabrika montaj hatlarının sonunda kalite kontrol proseslerinde, yazılım ayarlama (chip-tuning) firmalarının motor performansını arttırmaya yönelik uygulamaları öncesi ve sonrasında, oto ekspertiz firmalarının ikinci el araç kontrollerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak günümüzde oto ekspertiz firmaları tarafından gerçekleştirilen şasi dinamometre testlerinin doğruluğu ve güvenilirliği bir tartışma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [14]. Geçmiş çalışmalar incelendiğinde şasi dinamometreleri yardımı ile içten yanmalı motorlar ve şasi yapısına ait birçok parametre ölçümlerinin gerçekleştirilerek optimizasyon çalışmalarının yaygın olarak yapıldığı görülmektedir. Ancak şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının detaylı olarak araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, piyasada kullanılan şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının araştırılması için üç farklı taşıt, iki farklı oto ekspertiz firmasında test edilmiştir. Test sonuçlarında taşıtlara ait maksimum güç ve maksimum güç devri, maksimum tork ve maksimum tork devri, ayrıca bu değerlerin fabrika verilerinden sapma miktarları elde edilmiştir. Test taşıtlarının fabrika güç-tork eğrileri ile şasi dinamometre testlerinden elde edilen veriler karşılaştırılarak ölçüm sonuçlarının uygunluğu tartışılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, ikinci el otomotiv sektöründeki şasi dinamometre testleri ile alakalı yanlış bilgilerin önüne geçilmesi ve literatürdeki eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

2. ŞASI DİNAMOMETRELERİ (CHASSIS DYNAMOMETERS)

Başlıca taşıt test sistemlerinden olan şasi dinamometrelerinin farklı yapılarla birçok çeşidi bulunsada temelde bazı ortak özellikleri mevcuttur. Tüm şasi dinamometrelerinde taşıtı destekleyen ve tekerleklerin dönmesini sağlayan genellikle bir veya iki tambur bulunmaktadır. Benzer şekilde tüm şasi dinamometrelerinde tekerlekten güç alan veya bazı konfigürasyonlarda tekerleklere güç sağlayabilen yük sistemleri bulunması gerekmektedir [11]. Tambur sayısına göre genellikle tek tamburlu veya çift tamburlu olmak üzere iki tür şasi dinamometresi yaygındır [15-17]. Test sisteminin kullanım amacına göre kompakt yapıya sahip taşınabilir tekerlek gücü ölçüm sistemlerinden, tambur çapı 2 metreye varan lastik temas alanı kaynaklı gürültü ve titreşim ölçüm sistemlerine kadar çok çeşitli yapı ve boyuta sahip dinamometreler tasarlanmaktadır. Şasi

dinametrelerinde 1980'ler öncesinden günümüze kadar sırasıyla mekanik, mekanik-elektriksel ve elektriksel kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Modern dinamometrelerde AC

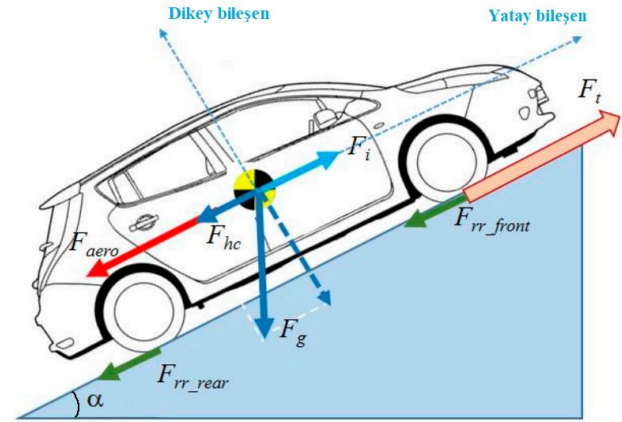
motorlar dinamik ve statik yanıt üstünlükleri nedeniyle DC motorlu dinamometrelerin önüne geçmiştir [1]. Şekil 1'de farklı tasarım yapısına sahip şasi dinamometreler görülmektedir.



Şekil 1. Farklı tasarım yapısına sahip şasi dinamometreleri [6,10,16] (Chassis dynamometers of different design)

Şasi dinamometrelerinde belirli bir test prosedürü tanımlanarak dayanıklılık, yakıt tüketimi, emisyon, motor performansı ve verimlilik gibi ölçümler yapılabilmektedir [6,7]. Yol koşullarını ve dirençlerini simüle eden test prosedürleri yokuş direnci, yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç, ivmelenme direnci ve atalet kuvvetlerini içermektedir. Motor verimliliklerinin [18-20] ve aktarma organları güç kayıplarının [21,22] belirlenmesi şasi dinamometrelerinde en sık gerçekleştirilen uygulamalardandır. Alt bileşen performansları ve verimlilikleri, taşıtın bir şasi dinamometresinde test edilmesi ve tahrik sistemindeki her bir sisteme ilişkin verilerin çıkarılmasıyla belirlenebilmektedir [23]. Ayrıca bu sistemler, gerçek koşulları simüle edebilmekte ve bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. Bu sayede otomotiv endüstrisi tarafından yeni teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılan güvenilir ve kontrollü test ortamını sağlamaktadır [8]. Yolda gerçekleştirilen bir taşıt testi ile karşılaştırıldığında şasi dinamometreleri üzerinde yapılan testler, karakteristik verilerin hassas bir şekilde elde edilmesinde daha ucuz ve etkilidir [15]. Tüm bu avantajlarından dolayı şasi dinamometrelerinden bilimsel çalışmalarda da yaygın olarak faydalanılmaktadır. Şasi dinamometreleri ile gerçekleştirilen çalışmalara içten yanmalı motor kaynaklı oluşan emisyonların araştırılması [24-28], aktarma organları verimliliğinin belirlenmesi [22], alternatif yakıtların motor performansı ve emisyonlara etkilerinin incelenmesi [29,30], hibrit ve elektrikli araçlarda batarya ve taşıt performansının saptanması [31-34], iç mekân gürültü ölçümlerinin gerçekleştirilmesi [35,36], fren sürtünme elemanları kaynaklı emisyonların incelenmesi [37,38], lastik temas alanı ve yuvarlanma dirençlerinin araştırılması [39-42], frenleme parametrelerinin taşıt dinamiğine etkilerinin incelenmesi [43,44] örnek olarak verilebilir.

Şasi dinamometre testleri, üretilen tahrik kuvvetine (F_t) karşılık taşıta seyir halinde etkiyen direnç kuvvetleri simüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Bunlar; aerodinamik direnç (F_{aero}), yuvarlanma direnci (F_{rr}), ivmelenme direnci (F_i) ve yokuş direnci (F_{hc}) kuvvetleridir. Taşıta etkiyen bu direnç kuvvetleri toplamı (F_{Load}), şasi dinamometresi tarafından frenleme kuvveti olarak yük sistemine etki ettirilmektedir. Seyir halindeki bir taşıta etkiyen kuvvetler Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Taşıta etki eden kuvvetler [45] (The forces acting on the vehicle)

Taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvveti (F_{aero}), Eş. 1 ile hesaplanmaktadır. Burada ρ hava yoğunluğunu, A taşıt izdüşüm alanını, C_d taşıtın hava direnç katsayısını, v taşıt hızını ve v_r rüzgâr hızını ifade etmektedir.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho A C_d (v + v_r)^2 \quad (1)$$

Tüm tekerleklere etki eden yuvarlanma direnci katsayısı (F_{rr}), Eş. 2 ve Eş. 3 ile hesaplanmaktadır. Burada F_{rr_front} ön tekerleklere etkiyen yuvarlanma direncini, F_{rr_rear} arka tekerleklere etkiyen yuvarlanma direncini, m taşıt kütlesini, g

yerçekimi ivmesini, α yolun eğim açısını ve C_{rr} yuvarlanma direnci katsayısını ifade etmektedir.

$$F_{rr} = F_{rr_front} + F_{rr_rear} \quad (2)$$

$$F_{rr} = mg \cos \alpha C_{rr} \quad (3)$$

İvmelenme direnci (F_i), Eş. 4 ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte m taşıt kütlesi ve a taşıt ivmesidir.

$$F_i = ma \quad (4)$$

Son olarak yokuş direnci (F_{hc}), Eş. 5 ile hesaplanmaktadır. Burada diğer eşitliklerde olduğu gibi m taşıt kütlesini, g yerçekimi ivmesini ve α ise yolun eğim açısını ifade etmektedir.

$$F_{hc} = mgsin\alpha \quad (5)$$

Seyir halindeki bir taşıta etkiyen direnç kuvvetleri toplamı (F_{Load}) ise Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

$$F_{Load} = F_{aero} + F_{rr} + F_i + F_{hc} \quad (6)$$

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Test Koşulları ve Kullanılan Şasi Dinamometreleri (Test Conditions and Used Chassis Dynamometers)

Ülkemizde ikinci el araç kontrollerinde yaygın olarak kullanılan şasi dinamometrelerinin ölçüm doğruluklarının araştırılmasında üç farklı araç, iki farklı oto ekspertiz firmasında test edilmiştir. Çalışmada gizlilik amacı ile firma isimleri A ve B harfleri ile temsil edilmektedir. Şasi dinamometre testleri yazılım ve tasarımları farklı üreticilere ait olan çift tamburlu cihazlarda gerçekleştirilmiştir. Firmalarda kullanılan şasi dinamometreler motor

devrine bağlı olarak değişen güç, tork ve tekerlek hızı değerlerini raporlamaya müsaade etmektedir.

Oto ekspertiz firmalarında kullanılan şasi dinamometrelerinin büyük bir çoğunluğu enkoder kullanarak tekerlek gücünü ölçmeye çalışmaktadır. Bu dinamometreler atalet prensibine göre motor güç ve tork hesaplaması yapmaktadır. Bu tip şasi dinamometrelerinde tekerlekten güç alan yük sistemleri bulunmamaktadır. Dolayısıyla tekerleklere yük olarak sadece tamburların kütsel atalet momenti etki etmektedir. Tambur çapı, üretim şekli ve ağırlığına bağlı olarak sistemin sağladığı atalet momenti de farklılık göstermektedir. Enkoderli ölçme sistemine sahip (a) ve elektromanyetik yük sistemine sahip (b) şasi dinamometreleri Şekil 3'te görülmektedir.

Taşıt testlerinin gerçekleştirildiği sıcaklık ve basınç koşulları Tablo 1'de görülmektedir. Şasi dinamometre testleri aynı lokasyondaki firmalarda gerçekleştirilerek rakım kaynaklı basınç farklarının test sonuçlarında sapmalara neden olması önlenmiştir. Artan rakım ile basınç ve dolgu yoğunluğu azalmakta bunun sonucu olarak motor performansında azalma gözlemlenmektedir. Benzer şekilde hava sıcaklığının da motor performansı üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Artan emme havası sıcaklığı sabit basınçta daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için dolgu miktarını azaltarak motor performansını olumsuz etkilemektedir. Çalışmanın yapıldığı lokasyonda rakım 887 m, testlerin gerçekleştirildiği tarihte ortalama atmosfer basıncı 900,78 hPa ve ortalama hava sıcaklığı 21,8 °C'dir [46].



Şekil 3. a) Enkoderli ve b) elektromanyetik yük sistemli şasi dinamometreleri (Chassis dynamometers with a) encoder and b) electromagnetic load system)

Tablo 1. Test koşulları (Test conditions)

Marka / Model	Sıcaklık (°C)	Basınç (hPa)
Volkswagen Jetta 1.6 TDI	21,6	900,78
Fiat Doblo 1.3 Multijet	21,3	904,16
Renault Fluence 1.5 dCi	22,7	897,39

3.2. Testlerde Kullanılan Taşıtların Özellikleri (Vehicle Features Used In The Tests)

Şasi dinamometre testlerinde kullanılan taşıtlara ait özellikler Tablo 2’de görülmektedir. Testlerde kullanılan tüm taşıtlar Common Rail yakıt enjeksiyonuna sahip, turboşarj beslemeli, Euro 5 emisyon normlarına uygun dizel motora ve manuel vites kutusuna sahiptir. Taşıtların silindir hacimleri, maksimum güç ve maksimum tork değerleri, güç-tork eğrileri ise birbirinden farklıdır.

Şasi dinamometrelerinde gerçekleştirilen tüm testlerde aşağıda açıklanan standart aşamalar izlenmiştir:

- Taşıtların motorunda sıvı kontrolleri yapılarak motor uygun çalışma sıcaklığına getirilmiştir.
- Testlerde kullanılan taşıtlardaki lastiklerin ölçümleri etkilememesi amacıyla dış derinliği aşınarak azalmamış tamamen yeni lastikler seçilmiştir.

- Taşıtlar platforma (tamburlar üzerine) çıkarılarak dinamometre üzerine halat, zincir vb. güvenlik ekipmanları ile sabitlenmiştir.
- Taşıtların ön kısmına hava akım sistemleri yerleştirilmiştir.
- Şasi dinamometrelerindeki ölçümler üretici firma talimatlarına (taşıtların hızı, vites kademesi, gaz konumu vb.) uygun olarak yapılmıştır.
- Taşıtların vitesi boşa alınarak tamburların durması beklenmiştir.
- Taşıtlar, platformdan alınarak test tamamlanmıştır. Taşıtların platforma çıkarılmasının ardından halat veya zincirler ile sabitlenmesinin sebebi test sırasında çıkılan yüksek hızlardan dolayı taşıtların platformdan sapmasını engellemektir. Testler sırasında gerçek yol koşullarındaki hava akımının sağlanması için taşıtların ön kısmına bir pervane veya fan sistemi yerleştirilmekte, bu hava akım sistemi ile taşıtların aşırı ısınması önlenmektedir.

Tablo 2. Test taşıtları özellikleri (Test vehicles features)

Marka / Model	Volkswagen Jetta 1.6 TDI	Fiat Doblo 1.3 Multijet	Renault Fluence 1.5 dCi
Üretim Yılı	2011	2012	2011
Motor Tipi	Turbo Dizel	Turbo Dizel	Turbo Dizel
Motor Hacmi (cm ³)	1598	1248	1461
Motor Kodu	CAYC	263A2	K9K G8/832
Güç (kW)	77 (4400 rpm)	66 (4000 rpm)	78 (4000 rpm)
Tork (Nm)	250 (2500 rpm)	200 (1500 rpm)	250 (2500 rpm)
Vites	5 İleri Manuel	5 İleri Manuel	6 İleri Manuel
Çekiş	Önden Çekiş	Önden Çekiş	Önden Çekiş
Lastik Ebatı	205/55R16	195/60R16	205/65R15
Taşıtların Ağırlığı (kg)	1392	1380	1285
Araç Kilometresi (km)	204547	225500	160092

4. BULGULAR (RESULTS)

Test sonuçlarından elde edilen bulgular üç ayrı taşıtlar için incelenmiştir. Firma test sonuçlarından elde edilen veriler ile fabrika güç-tork eğrileri grafik haline getirilerek karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

4.1. VW Jetta 1.6 TDI Test Sonuçları (VW Jetta 1.6 TDI Test Results)

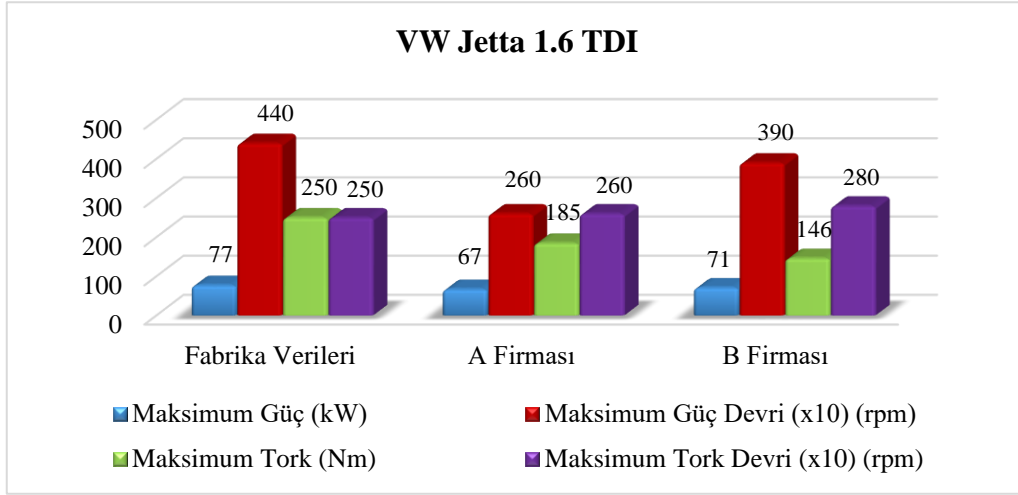
VW Jetta 1.6 TDI marka/model taşıta ait maksimum güç ve maksimum tork değerleri Şekil 4’te görülmektedir. Fabrika verilerine göre taşıtların 77 kW maksimum güce 4400 rpm motor devrinde ve 250 Nm maksimum torka 2500 rpm motor devrinde ulaşmaktadır. Taşıta ait test sonuçları incelendiğinde; A firması ölçümlerinde maksimum

güç miktarında %13, maksimum tork miktarında ise %26 oranında sapma görülmektedir. B firması ölçümlerinde ise maksimum güç miktarında %7,8 ve maksimum tork miktarında %41,6 oranında sapma ortaya çıkmıştır. Fabrika verilerine göre maksimum güç 4400 rpm motor devrinde elde edilmesi gerekirken A firmasında 2600 rpm motor devrinde, B firmasında ise 3900 rpm motor devrinde elde edilmiştir. Benzer şekilde maksimum tork devirlerinde de farklılıklar görülmektedir. Fabrika verilerine göre maksimum tork çıkışı 2500 rpm motor devrinde meydana gelirken A firmasında 2600 rpm motor devrinde, B firmasında ise 2800 rpm motor devrinde meydana gelmiştir.

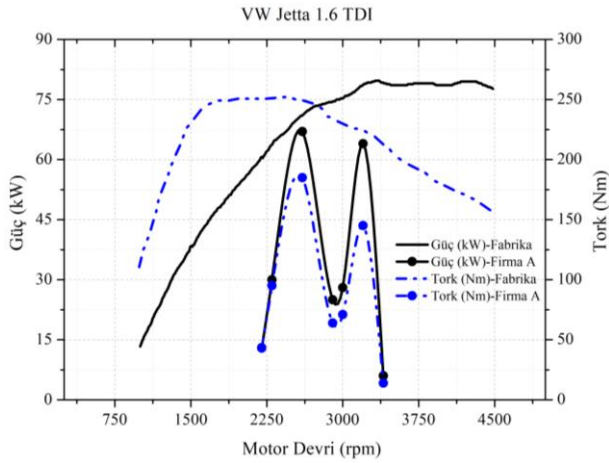
VW Jetta 1.6 TDI marka/model taşıta ait A ve B firmalarının ölçümlerinden elde edilen güç-tork

eğrileri sırasıyla Şekil 5 ve 6'da görülmektedir. Grafiklerde firma ölçümleri ve fabrika güç-tork eğrileri bir arada sunulmuştur. A firmasına ait güç-tork eğrileri incelendiğinde artan motor devrine bağlı olarak ortaya çıkan ani dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Ayrıca güç-tork eğrilerinin motor devrine bağlı olarak artış azalış biçimleri fabrika verileri ile uyum sağlamamaktadır. Şasi

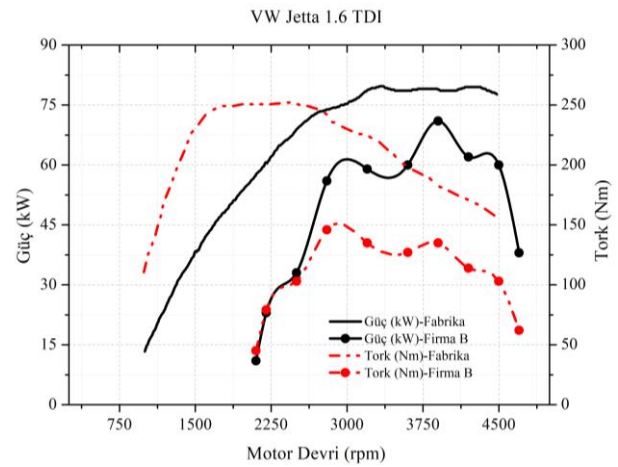
dinamometresinin güç ve tork ölçümü oldukça kısa bir motor devri aralığında gerçekleşmiştir. B firmasına ait güç-tork eğrileri incelendiğinde ise benzer dalgalanmalar karşımıza çıkmaktadır. Eğri formları fabrika verileri ile kısmen uyumlu olmakla birlikte her iki firma ölçümlerinde de güç ve tork değişim zamanlarında hatalar görülmektedir.



Şekil 4. VW Jetta 1.6 TDI maksimum güç ve maksimum tork değerleri (VW Jetta 1.6 TDI maximum power and maximum torque values)



Şekil 5. VW Jetta 1.6 TDI güç-tork eğrileri (A firması) (VW Jetta 1.6 TDI power-torque curves (Company A))



Şekil 6. VW Jetta 1.6 TDI güç-tork eğrileri (B firması) (VW Jetta 1.6 TDI power-torque curves (Company B))

4.2. Renault Fluence 1.5 dCi Test Sonuçları (Renault Fluence 1.5 dCi Test Results)

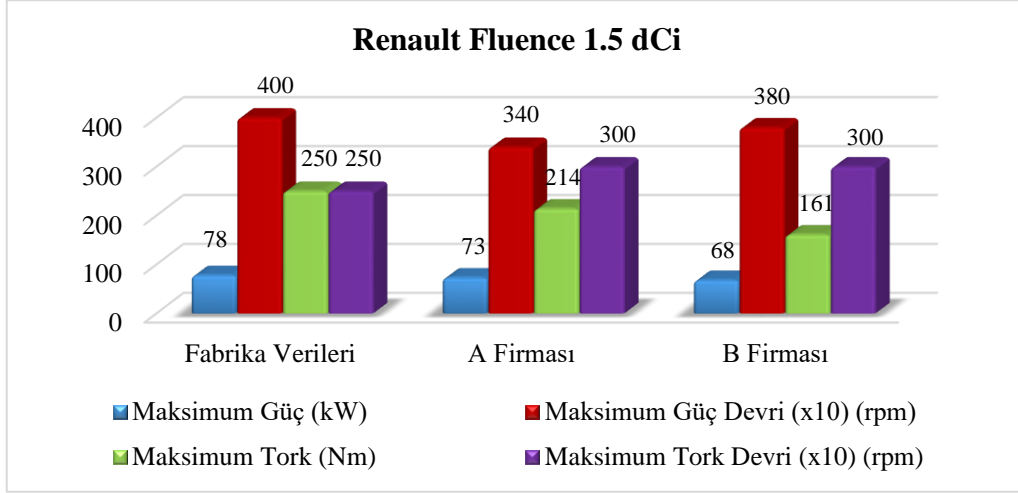
Renault Fluence 1.5 dCi marka/model taşıta ait maksimum güç ve maksimum tork değerleri Şekil 7'de sunulmuştur. Fabrika verilerine göre taşıt 78 kW maksimum güce 4000 rpm motor devrinde ve 250 Nm maksimum torka 2500 rpm motor devrinde ulaşmaktadır. Taşıta ait test sonuçları incelendiğinde; A firması ölçümlerinde maksimum güç 3400 rpm motor devrinde %6,4 sapma ile

maksimum tork ise 3000 rpm motor devrinde %14,4 oranında sapma ile sonuçlanmıştır. B firması ölçümlerinde ise maksimum güç için 3800 rpm motor devrinde %12,8 sapma, maksimum tork için 3000 rpm motor devrinde %35,6 oranında sapma tespit edilmiştir.

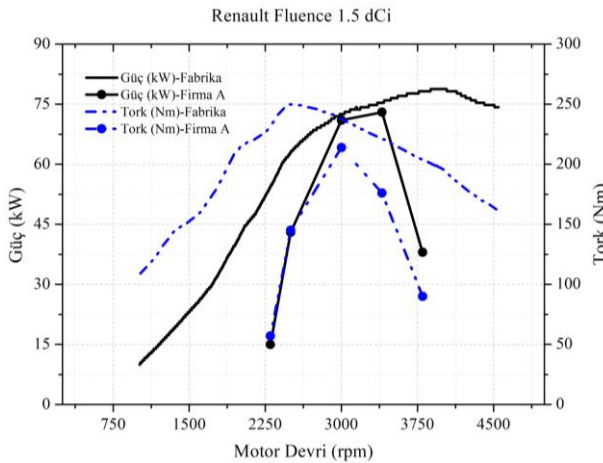
Renault Fluence 1.5 dCi marka/model taşıta ait A ve B firmalarının ölçümlerinden elde edilen güç-tork eğrileri sırasıyla Şekil 8 ve 9'da görülmektedir. A firmasına ait güç-tork eğrileri incelendiğinde birinci

taşıtta olduğu gibi eğri formlarının fabrika verileri ile uyum sağlamadığı, güç ve tork ölçümünün oldukça kısa bir motor devri aralığında gerçekleştiği görülmektedir. B firmasına ait güç-tork eğrileri

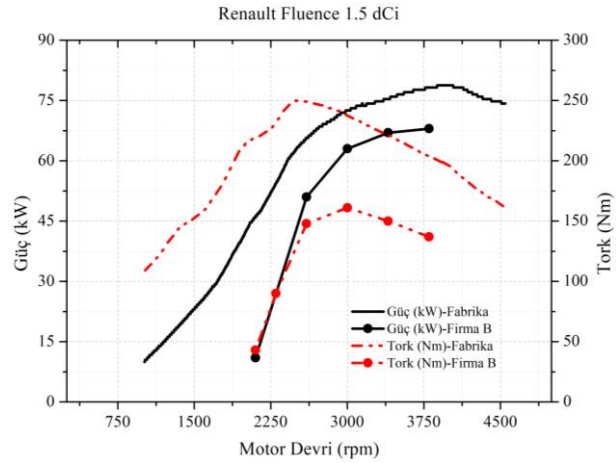
incelendiğinde ise eğri formlarının ilk taşıtta olduğu gibi fabrika verileri ile kısmen uyumlu olduğu ancak güç ve tork değişim zamanlarında hatalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7. Renault Fluence 1.5 dCi maksimum güç ve tork değerleri (Renault Fluence 1.5 dCi maximum power and maximum torque values)



Şekil 8. Renault Fluence 1.5 dCi güç-tork eğrileri (A firması) (Renault Fluence 1.5 dCi power-torque curves (Company A))



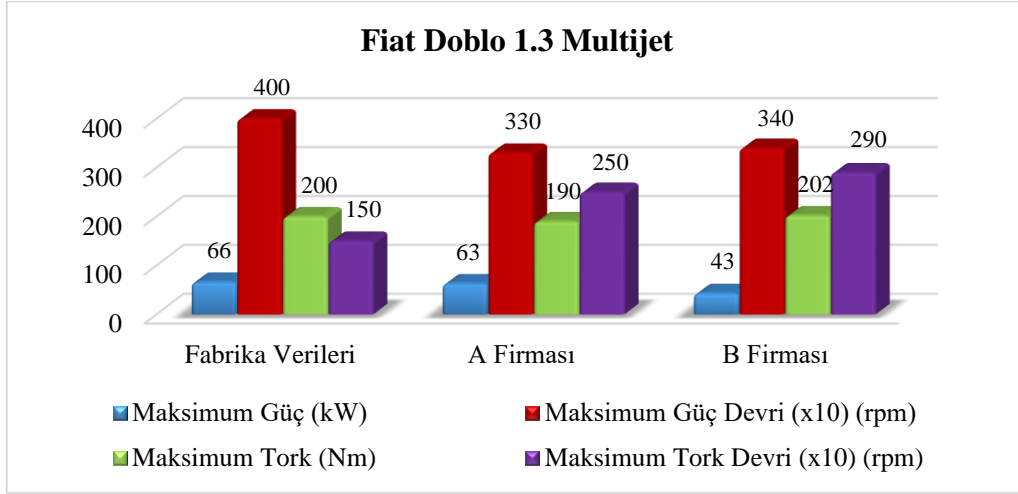
Şekil 9. Renault Fluence 1.5 dCi güç-tork eğrileri (B firması) (Renault Fluence 1.5 dCi power-torque curves (Company B))

4.3. Fiat Doblo 1.3 Multijet Test Sonuçları (Fiat Doblo 1.3 Multijet Test Results)

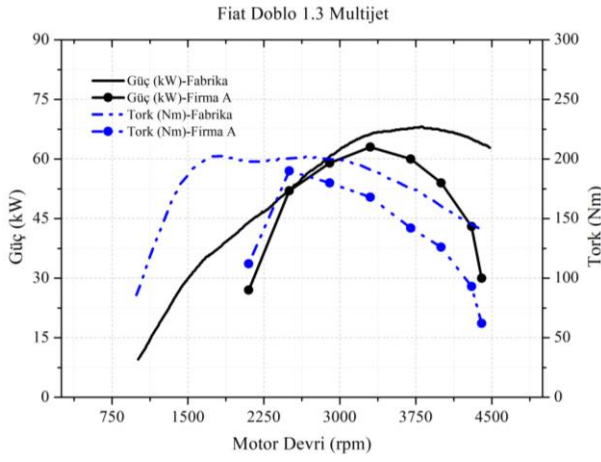
Fiat Doblo 1.3 Multijet marka/model taşıta ait maksimum güç ve maksimum tork değerleri Şekil 10'da görülmektedir. Fabrika verilerine göre taşıt 66 kW maksimum güce 4000 rpm motor devrinde ve 200 Nm maksimum torka 1500 rpm motor devrinde ulaşmaktadır. Taşıta ait test sonuçları incelendiğinde; A firması ölçüm sonuçlarında maksimum güç 3300 rpm motor devrinde %4,5 ve maksimum tork 2500 rpm motor devrinde %5 oranında sapma ile sonuçlanmıştır. B firması ölçümlerinde ise maksimum güç 3400 rpm motor

devrinde %34,8 ve maksimum tork 2900 rpm motor devrinde %1 oranında sapma ile sonuçlanmıştır.

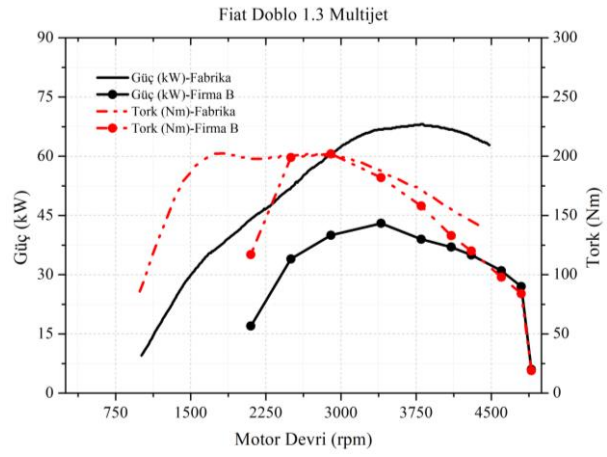
Fiat Doblo 1.3 Multijet marka/model taşıta ait A ve B firmalarının ölçümlerinden elde edilen güç-tork eğrileri sırasıyla Şekil 11 ve 12'de görülmektedir. A ve B firmasına ait güç-tork eğrileri incelendiğinde eğri formlarının fabrika verileri ile kısmen uyum sağladığı, ancak diğer ölçümlerde olduğu gibi güç ve tork ölçümünün oldukça kısa bir motor devri aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Güç ve tork değişim zamanlarında ise benzer şekilde yüksek miktarda hatalar karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 10. Fiat Doblo 1.3 Multijet maksimum güç ve tork değerleri (Fiat Doblo 1.3 Multijet maximum power and maximum torque values)



Şekil 11. Fiat Doblo 1.3 Multijet güç-tork eğrileri (A firması) (Fiat Doblo 1.3 Multijet power-torque curves (Company A))



Şekil 12. Fiat Doblo 1.3 Multijet güç-tork eğrileri (B firması) (Fiat Doblo 1.3 Multijet power-torque curves (Company B))

Firmalara ait test sonuçları güç-tork eğrilerinin, maksimum güç ve tork değerlerinin ve bu değerlerin ortaya çıktığı motor devirlerinin fabrika verileri ile büyük oranda uyumsuz olduğunu göstermektedir. Taşıt kilometreleri, model yılları ve bakım durumları dikkate alındığında fabrika verilerinden düşük miktarlarda performans elde edilmesi olağandır. Ancak firmalara ait test sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında da kabul edilemeyecek sapmalar tespit edilmiştir. Piyasada yaygın olarak kullanılmakta olan şasi dinamometreleri yalnızca tekerleklerin tahrik ettiği tamburların kütlesi tarafından bir ataletle maruz bırakılmaktadır. Dolayısıyla gerçek yol şartlarını ve yuvarlanma direncini sağlamada salt mekanik aksamı ile yetersiz kalabilmektedir. Bunun yerine piyasa ve imalat teknikleri açısından eski tip sayılsa da manyetik retarderli şasi dinamometreleri, taşıt tekerleklerinin döndürmeye çalıştığı tamburlara

direnç uygulayabilmektedir. Ancak bu tip şasi dinamometrelerinin manyetik retarder içermesi nedeniyle üretim maliyetleri yalnızca tambur kullanılan şasi dinamometrelerine göre daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle şasi dinamometresi üreticileri açısız atalet momentinin değişim hızından yola çıkarak güç ve tork hesabının yapılabildiği retardersiz şasi dinamometrelerine yönelmiştir. Bu tip üretimde ise yine maliyeti azaltmak için içi dolu tamburlar yerine kalın sac malzeme bükülüp silindir halinde kaynatılarak elde edilen tamburlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla tambur imalatında kullanılan sac malzemenin kalınlığı tamburlardan sağlanacak olan açısız atalet momentini belirlemek için önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte farklı dinamometre üreticileri yine maliyet kaygısıyla olması gerekenden daha ince sac malzemeler kullanarak ölçüm hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır.

Burada oluşan hassasiyet kayıpları yazılımda kullanılabilir düzeltme faktörü hesapları bir miktar azaltabilmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar üretim süreçlerindeki belirsizlikler nedeniyle objektif olmaktan uzak kalmakta ve yanıltıcı olabilmektedir

Şasi dinamometre testlerine ait detaylı sonuçlar ve firma ölçümlerinin fabrika verilerinden sapma oranları Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Test sonuçları ve sapma oranları (Test results and deviation rates)

VW Jetta 1.6 TDI					
	Fabrika Verileri	A Firması	Sapma (%)	B Firması	Sapma (%)
Maksimum Güç (kW)	77	67	13,0	71	7,8
Maksimum Güç Devri (rpm)	4400	2600	40,9	3900	11,4
Maksimum Tork (Nm)	250	185	26,0	146	41,6
Maksimum Tork Devri (rpm)	2500	2600	4,0	2800	12,0
Fiat Doblo 1.3 Multijet					
	Fabrika Verileri	A Firması	Sapma (%)	B Firması	Sapma (%)
Maksimum Güç (kW)	66	63	4,5	43	34,8
Maksimum Güç Devri (rpm)	4000	3300	17,5	3400	15,0
Maksimum Tork (Nm)	200	190	5,0	202	1,0
Maksimum Tork Devri (rpm)	1500	2500	66,7	2900	93,3
Renault Fluence 1.5 dCi					
	Fabrika Verileri	A Firması	Sapma (%)	B Firması	Sapma (%)
Maksimum Güç (kW)	78	73	6,4	68	12,8
Maksimum Güç Devri (rpm)	4000	3400	15,0	3800	5,0
Maksimum Tork (Nm)	250	214	14,4	161	35,6
Maksimum Tork Devri (rpm)	2500	3000	20,0	3000	20,0

5. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Taşıt test sistemlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliği birçok farklı parametrenin uygun ekipman ve yöntem ile ölçülerek doğru bir şekilde işlenmesi ile mümkündür. Şasi dinamometrelerinin amaca uygun özellikleri, kalitesi ve kalibrasyonunun yanı sıra standartlaşmış doğru ölçüm yöntemi ve operatörün uzmanlığı test sonuçlarının doğruluğunda büyük rol sahibidir.

Tüm taşıt testlerinde oluşan önemli miktardaki farklılığın en temel sebebi testlerin gerçekleştirildiği firmalarda kullanılan şasi dinamometrelerinin atalet prensibine göre güç ve tork hesaplaması yapmasıdır. Bu tip şasi dinamometrelerin de tekerlekten güç alan yük sistemleri bulunmamasından dolayı sadece tamburların ağırlıklarından kaynaklı kütle atalet momentleri tekerleklere yük olarak etki etmektedir.

Dolayısıyla tambur çapı, üretim şekli ve ağırlığına bağlı olarak sistemin sağladığı atalet momenti de değişmektedir. Farklı tasarım yapısına sahip şasi dinamometreleri ve farklı özelliklere sahip taşıtlarda gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarında sapmalar meydana gelmesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla farklı dinamometrelerde gerçekleştirilen testlerin doğruluk ve tekrarlanabilirliği zayıftır. Şasi dinamometresi üreticileri bir deneysel düzeltme faktörü ile bu atalet momenti kaynaklı ölçüm farklılığını giderme yoluna gitmektedir. Ancak tamburlar yeterli özelliklere sahip olsa dahi kullanılan düzeltme faktörü tek bir taşıt tipi için geçerli olmaktadır. Her aracın ağırlığı ve dolayısıyla maruz kaldığı yuvarlanma direnci farklılık gösterdiği için ölçüm sonuçlarında sapmalar ortaya çıkmaktadır. Bu yapıdaki şasi dinamometrelerinin hassas ölçümden ziyade kıyaslama amacıyla kullanımı uygundur. Başka bir deyişle, oto ekspertiz firmalarında

kullanılan şasi dinamometrelerinde gerçekleştirilen ölçümler objektif olmaktan oldukça uzaktır. Bunun ise temel nedeni manyetik retarder veya bir DC motor ile tekerleklerin tahrik ettiği tamburlara direnç uygulanmamasıdır. Bu nedenle tamburların açısız atalet momentinden yola çıkılarak ölçümler sağlanmaktadır. Açısız atalet momenti ise kullanılan malzemenin kütlesi ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla maliyet azaltma kaygısı ölçüm hassasiyetinde azalmaya yol açabilmektedir.

Ayrıca şasi dinamometresinde ölçülen değerlerin motor performans değerleri veya motor ömrü olarak müşterilere sunulması yapılan en büyük yanlışlardan biridir. Şasi dinamometreleri tekerlek hızı, gücü ve torkunu ölçerek aktarma organları dışı oranları, lastik çapı gibi boyutsal parametreler ile motor güç ve tork değerlerine dönüştürmektedir. Dolayısıyla tüm bu boyutsal parametreler ile alt sistem ve parçaların mevcut durumları (lastik dış derinliği, debriyaj balatası aşınma miktarı) ölçüm sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Motor performansı ve ömrü hakkında ancak motor dinamometre testleri veya kompresyon testleri ile doğru sonuçlar elde etmek mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 17.TEKNOLOJİ.03) tarafından desteklenmiş olup desteklerinden dolayı 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 declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

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

Turan Alp ARSLAN: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

Hüseyin BAYRAKÇEKEN: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

İbrahim MUTLU: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

He conducted the experiments and analyzed the results

Faruk Emre AYSAI: Literatür incelemesi yapmış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He reviewed the literature 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] Zhang X., & Zhou Z. (2020). Research on development of vehicle chassis dynamometer. Journal of Physics: Conference Series, 1626, 012150.
- [2] Casadei S., & Maggioni A. (2016). Performance testing of a locomotive engine aftertreatment pre-prototype in a passenger cars chassis dynamometer laboratory. Transportation Research Procedia, 14, 605-614.
- [3] Altay H., & Livatyalı H. (2022). Elektrikli araçlar için bir şasi dinamometresi tasarımı. Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, 20(2), 17-28.
- [4] Bielaczyc P., Woodburn J., & Szcotka A. (2016). Exhaust emissions of gaseous and solid pollutants measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC chassis dynamometer driving cycles. SAE Technical Paper, doi:10.4271/2016-01-1008.
- [5] Lohse-Busch H., Stutenberg K., Duoba M., Liu X., Elgowainy A., Wang M., Wallner T., Richard B., & Christenson M. (2020). Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18°C to positive 35°C temperatures. International Journal of Hydrogen Energy, 45(1), 861-872.
- [6] Lairenlakpam R., Kumar P., & Thakre G. (2020). Experimental investigation of electric vehicle performance and energy consumption on chassis dynamometer using drive cycle analysis. SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy, 1(1), 23-38.

- [7] Jouanne A., Adegbohun J., Collin R., Stephens M., Thayil B., Li C., Agamoh E., & Yokochi A. (2020). Electric vehicle (EV) chassis dynamometer testing. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 897-904.
- [8] Wager G., McHenry M.P., Whale J., & Braunl T. (2014). Testing energy efficiency and driving range of electric vehicles in relation to gear selection. *Renewable Energy*, 62, 303-312.
- [9] Yang Z., Deng B., Deng M., & Huang S. (2018). An overview of chassis dynamometer in the testing of vehicle emission. *MATEC Web of Conferences*, 175, 02015.
- [10] Bayram H. (2016). Şasi dinamometreli klimatik oda test simülöründe araç modeli oluşturma ve doğrulama süreci. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 451-464.
- [11] French M., & Stark A. (2000). Chassis dynamometers. *Experimental Techniques*, 45-46.
- [12] Dardiotis C., Fontaras G., Marotta A., Martini G., & Manfredi U. (2015). Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. *Fuel*, 140, 531-540.
- [13] Van Mierlo J., Magetto G. Van de Burgwal E., & Gense R. (2004). Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(1), 43-50.
- [14] Doruk Ö.T. (2020). Güvenli liman mı yoksa spekülâtif bir limon mu? Covid-19 döneminde Türkiye’de ikinci el otomotiv piyasası ve belirsizlik ilişkisi üzerine bir inceleme. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, 19, COVID-19 Special Issue, 274-287.
- [15] Lourenço M.A.M., Eckert J.J., Silva F.L., Santiciolli F.M., & Silva L.C.A. (2022). Vehicle and twin-roller chassis dynamometer model considering slip tire interactions. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, doi:10.1080/15397734.2022.2038199.
- [16] Eckert J.J., Bertoti E., Costa E.S., Santiciolli F., Yamashita R., Silva L., & Dedini F.G. (2017). Experimental evaluation of rotational inertia and tire rolling resistance for a twin roller chassis dynamometer. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2017-36-0212.
- [17] Silva L.C.A., Dedini F.G., Correa F.C., Eckert J.J., & Becker M. (2016). Measurement of wheelchair contact force with a low cost bench test. *Medical Engineering & Physics*, 38(2), 163-170.
- [18] Duoba M., Ng H., & Larsen R. (2000). In-situ mapping and analysis of the Toyota Prius HEV engine. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2000-01-3096.
- [19] Bohn T., & Duoba M. (2005). Implementation of a non-intrusive in-vehicle engine torque sensor for benchmarking the Toyota Prius. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2005-01-1046.
- [20] Ha K., Kong J., & Kim W. (2007). Development of an engine torquemeter for in-vehicle application and parametric study on fuel consumption contribution. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2007-01-0964.
- [21] Deping Z., & Yimin M. (2013). A method for measuring power loss distribution of mini-car driveline. *Information Technology Journal*, 12(14), 2980-2984.
- [22] Irimescu A., Mihon L., & Pădure G. (2011). Automotive transmission efficiency measurement using a chassis dynamometer. *International Journal of Automotive Technology*, 12(4), 555-559.
- [23] Moskalik A., Dekraker P., Kargul J., & Barba D. (2015). Vehicle component benchmarking using a chassis dynamometer. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 8(3), 869-879.
- [24] Pelkmans L., & Debal P. (2006). Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(4), 233-241.
- [25] Zhen F., Clark N.N., Bedick C.R., Gautam M., Wayne W.S., Thompson G.J., & Lyons W. (2009). Development of a heavy heavy-duty diesel engine schedule for representative measurement of emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(8), 950-959.
- [26] Biswas S., Verma V., Schauer J.J., Cassee F.R., Cho A.K., & Sioutas C. (2009). Oxidative potential of semi-volatile and non volatile particulate matter (PM) from heavy-duty vehicles retrofitted with emission control technologies. *Environmental Science and Technology*, 43(10), 3905-3912.
- [27] Andersson J., May J., Favre C., Bosteels D., Vries S., Heaney M., Keenan M., & Mansell J. (2014). On-road and chassis dynamometer evaluations of emissions from two Euro 6 diesel vehicles. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 7(3), 919-934.

- [28] Chen L., Wang Z., Liu S., & Qu L. (2018). Using a chassis dynamometer to determine the influencing factors for the emissions of Euro VI vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 564-573.
- [29] Örs İ., Tarakçioğlu N., & Ciniviz M. (2009). Yakıt olarak benzin-etanol karışımlarının taşıt performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(1), 13-19.
- [30] Kaya T., Kutlar O.A., & Taşkıran Ö.O. (2020). Investigation of the effects of biodiesel obtained from canola on performance, emissions and combustion characteristics under the NEDC and steady state loads. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3), 1437-1453.
- [31] Shiau C.S.N., Kaushal N., Hendrickson C.T., Peterson S.B., Whitacre J.F., & Michalek J.J. (2010). Optimal plug-in hybrid electric vehicle design and allocation for minimum life cycle cost, petroleum consumption, and greenhouse gas emissions. *Journal of Mechanical Design*, 132, 091013.
- [32] Kim N., & Rousseau A. (2016). Parameter estimation for a lithium-ion battery from chassis dynamometer tests. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 4393-4400.
- [33] Song K., Li F., Hu X., He L., Niu W., Lu S., & Zhang T. (2018). Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm. *Journal of Power Sources*, 389, 230-239.
- [34] Mayyas A.R., Kumar S., Pisu P., Rios J., & Jethani P. (2017). Model-based design validation for advanced energy management strategies for electrified hybrid power trains using innovative vehicle hardware in the loop (VHIL) approach. *Applied Energy*, 204, 287-302.
- [35] Chen J., Liu C., Zhang X., Zhang Y., & Li J. (2021). An approach for indoor prediction of the pass-by noise of a vehicle based on the time-domain equivalent source method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 107037.
- [36] Kim Y.D., Jeong J., Park J., Yang I., Park T., Muhamad P., Choi D., & Oh J. (2013). Optimization of the lower arm of a vehicle suspension system for road noise reduction by sensitivity analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 69, 278-302.
- [37] Chasapidis L., Grigoratos T., Zygogianni A., Tsakis A., & Konstandopoulos A.G. (2018). Study of brake wear particle emissions of a minivan on a chassis dynamometer. *Emission Control Science and Technology*, 4, 271-278.
- [38] Mathissen M., Grigoratos T., Lahde T., & Vogt R. (2019). Brake wear particle emissions of a passenger car measured on a chassis dynamometer. *Atmosphere*, 10(9), 556.
- [39] Soica A., Budala A., Monescu V., Sommer S., & Owczarzak W. (2020). Method of estimating the rolling resistance coefficient of vehicle tyre using the roller dynamometer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3194-3204.
- [40] Martyr A., & Plint M. (2012). Chassis or rolling-road dynamometers. Oxford: Butterworth-Heinemann, Chapter 17, In *Engine testing*, 4th ed., 451-482.
- [41] Pexa M., Mader D., Cedık J., Peterka B., Müller M., Valasek P., & Hloch S. (2019). Experimental verification of small diameter rollers utilization in construction of roller test stand in evaluation of energy loss due to rolling resistance. *Measurement*, 152, 107287.
- [42] Ejsmont J., & Owczarzak W. (2019). Engineering method of tire rolling resistance evaluation, *Measurement*, 145, 144-149.
- [43] Bayrakçeken H., Girgin Z., Aysal F.E., & Babagiray M. (2021). The experimental investigation and nonlinear regression analysis of the effect of tire inflation pressure on pitch force. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(1), 1-7.
- [44] Bayrakçeken H., Türkbay T., Aysal F. E., & Yavuz H. (2020). Panik frenleme davranışının yarım taşıt test cihazında incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 730-740.
- [45] Jimenez D., Hernandez S., Fraile-Ardanuy J., Serrano J., Fernandez R., & Alvarez F. (2018). Modelling the effect of driving events on electrical vehicles energy consumption using inertial sensors in smartphones. *Energies*, 11(2), 412.
- [46] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Hava Durumu Verileri, <https://www.mgm.gov.tr/>

Cathode Materials for Microbial Fuel Cells

Işıl BİLGİÇ^{1*} 

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

Article Info

Review article
Received: 07/05/2023
Revision: 07/06/2023
Accepted: 12/06/2023

Keywords

Microbial fuel cells
Oxygen reduction reaction
Cathode catalysts
Cost-effective catalysts

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 07/06/2023
Kabul: 12/06/2023

Anahtar Kelimeler

Mikrobiyal yakıt hücreleri
Oksijen indirgeme
reaksiyonu
Katot katalizörleri
Uygun maliyetli
katalizörler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Organic and inorganic contents in wastewater can be seen as potential energy sources. MFCs are the only systems that can convert the chemical energy in the organic and inorganic content of wastewater into electricity. In this study, cathode materials used in MFCs examined, and alternative materials were discussed. / Atık sularındaki organik ve inorganik içerikler potansiyel enerji kaynakları olarak görülebilir. MFC'ler atıksuyun organik ve inorganik içeriğindeki kimyasal enerjiyi elektriğe dönüştürebilen yegane sistemlerdir. Bu çalışmada MFC'lerde kullanılan katot malzemeleri incelenmiş ve alternatif malzemeler tartışılmıştır.

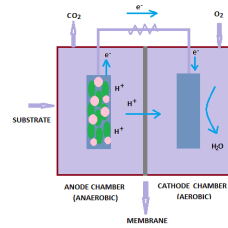


Figure A: Schematic Diagram of Microbial Fuel Cell / Şekil A: Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Şematik Diyagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- MFCs are unique systems in which microorganisms -instead of catalysts- and organic and inorganic molecules -instead of enzymes- at the anode are used to convert chemical energy to electrical energy. / MFC'ler, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için -katalizörler yerine- mikroorganizmaların ve anotta -enzimler yerine- organik ve inorganik moleküllerin kullanıldığı benzersiz sistemlerdir.
- MFC system is the most efficient method because of the bio-electrochemical design of this system which allows the purification of wastewater during the production of electricity. / MFC sistemi, elektrik üretimi sırasında atık suyun arıtılmasına olanak sağlayan biyo-elektrokimyasal tasarımı nedeniyle en verimli yöntemdir.
- The majority of the costs of MFCs are the catalyst materials used in the cathode. / MFC'lerin maliyetlerinin büyük bölümü katotta kullanılan katalizör malzemeleridir.

Aim (Amaç): In this study, the cathode materials used in MFCs were examined and alternative materials were discussed in terms of performance and cost. / Bu çalışmada MFC'lerde kullanılan katot malzemeleri incelenmiş, performans ve maliyet açısından alternatif malzemeler tartışılmıştır.

Originality (Özgünlük): By reviewing the literature, the effects of cathode materials used in MFCs on electrochemical performance are summarized. / Literatür incelenerek MFC'lerde kullanılan katot malzemelerinin elektrokimyasal performansa etkileri özetlenmiştir.

Results (Bulgular): Pt is a high-performance cathode material in terms of power density but it is an expensive material. For this reason, relatively cheaper materials such as graphite, carbon, Fe, Ni have been tested instead of Pt, and high power densities have been achieved. / Pt, güç yoğunluğu açısından yüksek performanslı bir katot malzemesidir ancak pahalı bir malzemedir. Bu nedenle Pt yerine grafit, karbon, Fe, Ni gibi nispeten daha ucuz malzemeler test edilmiş ve yüksek güç yoğunlukları elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): Studies on MFC have focused on reducing the use of expensive catalysts such as Pt, thus reducing system cost. It is possible to achieve high power densities in MFCs by using lower-cost cathode catalysts such as carbon and graphite-based materials or Fe and Mn. Further development of metal-carbon hybrid catalysts will provide high-performance and low-cost MFCs. / MFC ile ilgili çalışmalar, Pt gibi pahalı katalizörlerin kullanımının azaltılmasına ve dolayısıyla sistem maliyetinin düşürülmesine odaklanmıştır. Karbon ve grafit bazlı malzemeler veya Fe ve Mn gibi daha düşük maliyetli katot katalizörleri kullanarak MFC'lerde yüksek güç yoğunlukları elde etmek mümkündür. Metal-karbon hibrit katalizörlerinin daha da geliştirilmesi, yüksek performanslı ve düşük maliyetli MFC'ler sağlayacaktır.



Cathode Materials for Microbial Fuel Cells

Işıl BİLGİÇ^{1*}

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

Article Info

Review article
Received: 07/05/2023
Revision: 07/06/2023
Accepted: 12/06/2023

Keywords

Microbial fuel cells
Oxygen reduction reaction
Cathode catalysts
Cost-effective catalysts

Abstract

Titanium alloys are one of the materials that are difficult to process due to their high strength. The most important problems of today are meeting the increasing energy needs and avoiding environmental pollution caused by fossil resources usage for energy production. In addition, the decrease in usable water in the world has become a threat to human health and the population. Microbial fuel cells (MFC) have become more interesting in recent years because of their potential to solve these three important problems. Organic and inorganic contents in wastewater can be seen as potential energy sources. MFCs are the only systems that can convert the chemical energy in the organic and inorganic content of wastewater into electricity. While this transformation is realized, the process of cleaning the wastewater can be done. Reducing the costs of these systems is the most important parameter to accelerate the use of the system. In particular, studies on reducing the cost and increasing the efficiency of the catalysts used in the cathode compartment where the oxygen reduction reaction takes place are predominant. In this study, cathode materials used in MFCs examined, and alternative materials were discussed.

Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İçin Katot Malzemeleri

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 07/06/2023
Kabul: 12/06/2023

Anahtar Kelimeler

Mikrobiyal yakıt hücreleri
Oksijen indirgeme
reaksiyonu
Katot katalizörleri
Uygun maliyetli
katalizörler

Öz

Günümüzün en önemli sorunları arasında artan enerji ihtiyacını karşılamak ve fosil kaynakların enerji üretimi için kullanımından kaynaklanan çevre kirliliğinin önlenmesi yer almaktadır. Ayrıca, dünyadaki kullanılabilir sudaki azalma insan sağlığı ve nüfusu için bir tehdit haline gelmiştir. Mikrobiyolojik yakıt hücreleri (MYH) bu üç önemli sorunu çözme potansiyeli sebebiyle son yıllarda daha ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Atık sulardaki organik ve inorganik içerikler potansiyel bir enerji kaynağı olarak görülebilir. MYH'ler, atık suyun organik ve inorganik içeriğindeki kimyasal enerjiyi elektriğe dönüştürebilen tek sistemdir. Bu dönüşüm gerçekleştirilirken, atık suyun temizlenmesi işlemi yapılabilir. Bu sistemlerin maliyetlerini azaltmak, sistemin kullanımını hızlandırmak için en önemli parametredir. Son zamanlarda özellikle, oksijen indirgeme reaksiyonunun gerçekleştiği katot bölmesinde kullanılan katalizörlerin maliyetinin düşürülmesi ve verimliliğinin artırılması üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada, MYH 'lerde kullanılan katot malzemeleri incelenecek ve alternatif malzemeler tartışılacaktır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Fossil fuels used as energy sources are the main causes of global warming as well as important environmental problems. The increase in energy demand encourages fossil fuels to gradually disappear, the development of environmental consciousness, and researchers to find renewable and sustainable energy sources. Recently microbial fuel cell (MFC) systems have emerged that can use organic substances as fuel. MFC transforms biochemical energy, which is formed by the breakdown of organic substances, into electricity by the catalytic reactions of microorganisms. In

particular, the high organic content of sludges from domestic wastewater treatment plants has led to the use of MFC for sludge treatment and energy production.

MFCs can be described briefly; as systems to convert biochemical energy to electrical energy. MFCs are unique systems in which microorganisms -instead of catalysts- and organic and inorganic molecules -instead of enzymes- at the anode are used to convert chemical energy to electrical energy. MFC system is the most efficient method because of the bio-electrochemical design of this system which allows the purification of wastewater

during the production of electricity. MFCs generally consist of two chambers, an anode, and a cathode. Figure 1 shows a schematic diagram of a microbial fuel cell. These chambers are generally separated from each other by a membrane. The anode

chamber contains microorganisms that oxidize the existing nutrients. The cathode chamber is generally designed as an open ambient air chamber.

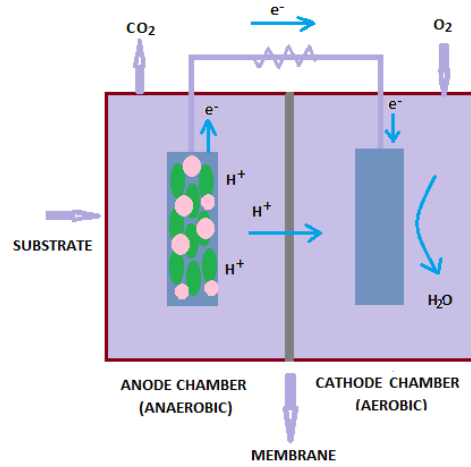


Figure 1. Schematic Diagram of Microbial Fuel Cell (Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Şematik Diyagramı)

By utilizing microbial metabolism, MFCs generate electrons and protons in the anodic chamber from the oxidation of organic matter present in the wastewater, which is then donated to the extracellular acceptor i.e. anode [1]. The protons, thus generated, migrate to the cathode chamber via the proton exchange membrane and help O_2 to get reduced to H_2O , thus producing electricity [2-3].

Although MFCs have many advantages, it is not preferred as an alternative energy production system due to their high costs and low energy production efficiency. The majority of the costs of MFCs are the catalyst materials used in the cathode.

The investment cost of MFC systems can be seen as the biggest obstacle to its common usage and increase in the percentage of usage among renewable energy sources. The average cost of MFC is 30 times higher than the cost of conventional wastewater treatment systems [4]. The cost of MFC's cathode material is 70.42% of the total cost [5-6].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, the tested cathode materials used in MFCs in the literature and the obtained power values were compared and the materials with the highest power values were determined. In the

selection of cathode materials, which is the most decisive parameter in the costs of MFCs, the selection of materials that are both cheaper and with the highest power value is very important. For this reason, researches are mostly in the direction of cathode material development. Metal-based, carbon-based, hybrid, and biocathode materials using these two materials together are the most widely researched today. While providing optimum conditions in MFC systems, expanding usage areas, and ensuring waste disposal, these studies are of great importance in order to produce electricity at the same time.

3. CATHODE CATALYSTS USED IN MFC (MFC'DE KULLANILAN KATOT KATALİZÖRLERİ)

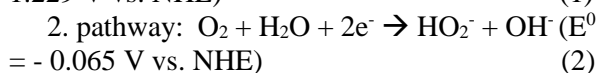
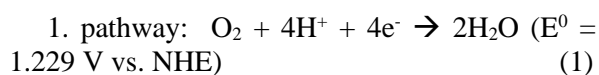
Due to the decrease of oxygen in the environment, the poor kinetics of the Oxygen Reduction Reaction (ORR) at the cathode is one of the important factors limiting the performance of MFC. Therefore, need for a catalyst at the cathode to avoid reduced performance in a low oxygen environment for the MFC system. Pt is generally used as a catalyst at the cathode [7]. However, Pt has disadvantages that include high cost, propensity for biofouling, and low surface poisoning tolerance in wastewater [8]. Even though oxygen has been considered the most suitable oxidant in the cathode compartment to enhance MFC performance during ORR, oxidants used as electron acceptors such as ferricyanide and

permanganate have been used to influence the ORR process [6-9-10-11-12].

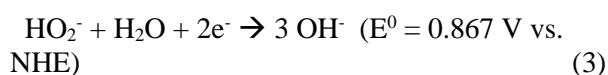
Because of the high cost of Pt, it has been necessitated the search for alternative catalysts. Non-precious metal catalysts are extensively investigated as Pt alternatives in fuel cells. It has been reported that catalysts without Pt group metals prepared by supporting transition metals such as Fe, Co, Zr, and N-doped carbon are used as cathode catalysts in MFCs to obtain equivalent electrochemical performance [13].

Various inexpensive, high catalytic activity and biofouling-resistant cathode electrode materials have been explored to enhance the power output from MFCs. These materials include carbon structures, metal complexes, metal oxides, conducting polymers, N-doped carbon, and others. Among the various electrode materials tested as cathode electrodes, carbon-based materials provided promising performance. For example, the bio-derived, heteroatom-doped carbon obtained from Alfalfa plant leaves provided higher cathodic catalyst activity and high power output of 1328.9 mW.m⁻² which was equivalent to the typical Pt/C cathodic catalyst provided 1337.7 mW.m⁻² power output [6-14]. Graphite materials used as cathode catalysts, chemically treated with H₃PO₄ and HNO₃ exhibited improved ORR properties in MFC and generated higher power densities of 7.9 Wm⁻³ and 6.5 Wm⁻³, respectively [6-15].

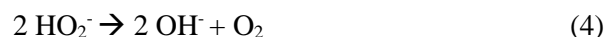
The kinetic rate of the ORR is low because of the high activation energy required to break the O=O bond (498 kJmol⁻¹) [16]. The ORR catalysts can follow two different pathways. One of them reduces oxygen through one step four-electron pathway which has a higher reduction potential. The second pathway is which less efficient two-electron pathway that generates highly reactive hydrogen peroxide and leads to damaged membranes and electrodes [17-18].



The second pathway followed by the reduction of HO₂⁻



or r by the more rapid disproportionation of HO₂⁻



According to the Nernst equation, the ORR potential at pH 7 can be calculated by using Equation (5):

$$E'_0 = E_0 - RT/nF \ln 1[\text{O}_2][\text{H}^+]^4 \quad (5)$$

in which R (8.314 JK⁻¹mol⁻¹) is the universal gas constant, T is the thermodynamic temperature, n is the number of electrons transferred, and F (9.648x10⁴ Cmol⁻¹) is the Faraday constant. Therefore, if T=298.15 K, pH 7.0, and [O₂]=0.2 mol L⁻¹, E'₀ is determined to be 0.805 V for the four-electron pathway [16].

3.1. Metal-Based Catalysts (Metal Bazlı Katalizörler)

Studies on MFC catalysts have been concentrated on Pt for a long time as it is an active catalyst. However, because Pt is an expensive metal, many studies have been performed to obtain high energy output in different catalyst combinations. Among them, Fe-based catalysts were the most prominent in terms of their high activity. In a study using a Fe-N-C catalyst 2437 ± 55 mW.m⁻² power output was obtained [19-20]. In addition, Ni [21], Fe-Mn [22], Co-Fe [23], and V-based catalysts [24] have come to the forefront due to their high power output. One of the biggest challenges in metal catalysts is their low stability. Leaching problems have been observed in alloy catalysts such as Pt-Co and Pt-Fe [25].

In addition, carbon-supported non-precious metal-based catalysts have been studied as alternative cathode catalysts for MFC, because of their low costs, high natural abundance, apparent catalytic activity, and good mechanical strength. In a study, MFC using Fe, N-codoped carbon as the cathode catalyst has been found to deliver a maximum power density (P_{max}) of 3118.9 mWm⁻². In another study in which nitrogen-doped carbon nanotubes (Co / NCNT) were used as a catalyst, a power density of 1260 mW.m⁻² was reached [8-26]. A study focused on sodium cobalt oxide (NaCo₂O₄) as a cathode catalyst reached 0.6 W.m⁻² [27]. Wu et al. (2019) developed and employed reduced graphene oxide (rGO) as a cathode catalyst in a membrane-less microbial fuel cell (MFC) [28]. rGO-based cathode exhibited better characterizations in structure and electron transfer than graphene oxide (GO)-based cathode [28].

Majidi et al. (2019), in their study, synthesized low-cost α -MnO₂ nanowires and α -MnO₂ nanowires supported on carbon Vulcan [29]. They reached 180 mW.m⁻² power density in their air cathode MFC (α -MnO₂/C as an ORR). However, Chiodoni et al. (2019), by using the Mn_xO_y as a cathode catalyst in MFC, achieved competitivable catalytic efficiency results with Pt-based catalysts [30].

3.2. Carbon-Based Catalysts (Karbon Bazlı Katalizörler)

Carbon black is widely used as the support material for metal catalysts due to its large specific surface area and high stability. At the same time, simple chemical modification and/or the introduction of functional groups can create active sites that make carbon black a metal-free ORR catalyst. Also carbon black is a very economic material as the catalyst, but its durability is still unknown for MFC systems [25].

Among the commonly used electrode materials, the majority are preferred activated carbon because of its low cost and large surface area [31]. Due to its electrochemical properties, activated carbon is a good support material for catalysts. While the current density of a Pt/C cathode dropped by 73% after 7 h of the chronoamperometry test, a nitrogen-doped AC cathode showed only 30% decrease. However, biofouling on the AC cathode and degenerated MFC performance were still observed [25].

Carbon nanotubes are more resistant than Pt/C as cathode catalysts. The reason for this is that graphitic-N in the carbon plane is thought to be less sensitive to protonation [25].

In addition, graphite and graphene-based catalysts were also used in MFCs. Zheng et al. (2015) in their study using graphite plates have been obtained 3215 ± 80 mW.m⁻² as a very high power density value [30-32].

3.3. Metal-Carbon Hybrid Catalysts (Metal-Karbon Hibrit Katalizörler)

Pt catalysts are generally used in fuel cells as carbon-supported. This increases the durability and surface area. High power densities were obtained in several MFC systems using Pt/C as cathode catalysts. In addition, non-precious metal catalysts are used, while active carbon, graphene, and graphite materials are also used as support. Metal

and carbon-based catalysts can be used as catalysts in one-by-one MFCs and can be synthesized together to form a suitable cathode catalyst material.

Although activated carbon has a low cost and wide surface area, it has a low catalytic activity. Various metals can be doped to enhance the electrocatalytic properties of the activated carbon in the ORR reaction. Lv et al. (2019) synthesized activated carbon-supported Fe-Ag-N multi-doped graphene as the air cathode catalyst in MFC [31]. They obtained the highest maximum power density up to 1956.45 mW.m⁻² [31]. Santoro et al. (2019) in their study using Fe-N-C cathode catalysts have reached a maximum power density of 36.9 W.m⁻³ [33].

In addition, metal nitrogen carbon complex catalysts have also been tested. Among them Ni/N-CNFs [33], Fe-N-C [33-35], Co/Fe-N-C [36] catalysts are prominent.

3.4. Biocathodes (Biyokatotlar)

Biological cathodes, after the initial investment, can be much lower cost than other cathodes. Compared with platinum-catalyzed cathodes, they have higher resistance to poisoning [37]. In addition to catalyzing the ORR, some catalysts help to improve the biological treatment of wastewater by performing further processes such as the reduction of nitrates, sulfates, and dyes [38-39-40].

Santoro et al. (2016) [41] in a study by using bilirubin oxidase as a cathode catalyst, obtained a power density of 2 W.m⁻² [42]. Christwardana et al. (2016), in their studies using laccase as enzymatic biocatalysts, have reached a power density of 102 ± 5.1 μW cm⁻² [43]. In another study by using laccase-producing white-rot fungus on the cathode, the maximum power density of 13.38 mW.m⁻² was reached [44].

4. RESULTS (BULGULAR)

When the studies on the development of MFC cathode materials and increasing the power density values obtained from these systems are summarized, it is seen that the cathode material with the highest power density value is graphite plate. Zheng et al. (2015) obtained a power density of 3215 mw/m² in their study using a graphite plate cathode [32]. This is followed by the study by Tang et al. (2016) in which 3D porous Fe-N-C on carbon paper cathode material was used and a high power density value of 3118.9 mw/m² was obtained [34].

Although Pt is a high-performance cathode material in terms of power density, it is an expensive material. For this reason, relatively cheaper materials such as graphite, carbon, Fe, Ni have been tested instead of Pt, and high power densities have been achieved. In particular, carbon-based materials are the optimum materials used as cathode materials in MFCs in terms of both cost and power density.

When we examined the alternative biocathodes used, the study by Breheny et al. (2019), in which bilirubin oxidase is used as the cathode material,

stands out with the power density value obtained [42]. Breheny et al. (2019) were able to reach a high power density value of 2000 mW/m² in their study [42]. This result showed that high power densities can be achieved by using alternative biocathodes in MFCs, giving hope for further studies.

Table 1. shows cathode catalysts used in MFCs in recent years and their power density values.

Table 1. Cathode Catalysts in MFC and Power Density Values (MFC'de Katot Katalizörleri ve Güç Yoğunluğu Değerleri)

Cathode	Power density (mW.m ⁻²)	Reference
Graphite plate	3215 ± 80	[32]
3D porous Fe-N-C on carbon paper	3118.9	[26]
Carbon brush	2777.7	[45]
Fe-N-C	2437 ± 55	[20]
Carbon cloth	2420	[46]
Pt and carbon cloth	2400	[47]
Carbon felt	2142	[48]
Carbon cloth	2110 ± 68	[49]
Carbon paper with Pt catalyst	2066	[50]
NiCo ₂ S ₄ /AC	2000 ± 59	[21]
Activated carbon-supported multi-doped graphene	1956.45	[31]
Fe-Mn	1940 ± 31	[51]
Graphite plates	1771	[52]
CoFe ₂ O ₄ @N-AC	1770.8 ± 15.0	[23]
Carbon cloth with three PDMS/carbon layers and Pt catalysts	1635 ± 62	[53]
Pt rod	1624	[54]
N and P dual-doped carbon derived from chitosan catalyst	1603	[53]
Cobalt oxide supported on N-doped CNT	1.260	[55]
V ₂ O ₅	1.073	[24]
Pseudomas biofilm	1056	[56]
Co/N/C based catalyst	931.1	[57]
Fe-containing N-doped carbon	900	[19]
MnO _x	48.4 ± 10.16	[58]

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The increasing population of the world brings with it an increase in the waste generated by consumption. Utilizing these wastes and their bio-

electrochemical energy content in MFC systems can be reduced environmental pollution and increased the amount of clean, renewable energy production. Therefore, active use of MFCs is very important for a future clean and sustainable world.

As seen in this study, in recent years, studies on MFC have focused on reducing the use of expensive catalysts such as Pt, thus reducing system cost. The studies show that it is possible to achieve high power densities in MFCs by using lower-cost cathode catalysts such as carbon and graphite-based materials or Fe and Mn. Again, further development of metal-carbon hybrid catalysts will provide high-performance and low-cost MFCs.

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)

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

Araştırmayı 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] Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R. A., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40, 5181-5192.

<https://doi.org/10.1021/es0605016>

[1] Kannan, M. V., & Kumar, G. G. (2016). Current status, key challenges and its solutions in the design and development of graphene based ORR catalysts for the

microbial fuel cell applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 77, 1208-1220.

<https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.10.018>

[2] Turk, K. K., Kruusenberg, I., Kibena, P. E., Bhowmick, G. D., Kook, M., Tammeveski, K., Matisen, L., Merisalu, M., Sammelselg, V., Ghangrekar, M. M., Mitra, A., & Banerjee, R. (2018). Novel multi walled carbon nanotube based nitrogen impregnated Co and Fe cathode catalysts for improved microbial fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(51), 23027-23035.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.143>

[3] He, L., Du, P., Chen, Y., Lu, H., Cheng, X., Chang, B., & Wang, Z. (2017). Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 388-403.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>

[4] Abourached, C., English, M. J., & Liu, H. (2016). Wastewater Treatment by Microbial Fuel Cell (MFC) prior irrigation water reuse. *Journal of Cleaner Production*, 137, 144-149.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.048>

[5] Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*, 221, 598-621.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>

[6] Huang, D., Li, M. J., Song, B.Y., & Liu Z. B. (2019). Structure and dynamics of microbial fuel cell catalyst layer. *Electrochimica Acta*, 300, 404-416.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.01.111>

[7] Wei X.Y., Liu, M., Yang, J., Du, W.N., Sun, X., Huang, Y.P., Zhang, X., Khalil, S.K., Lou, D.M., Zhou, Y.D. (2019). Characterization of PM2.5-bound PAHs and carbonaceous aerosols during three-month severe haze episode in Shanghai, China: Chemical composition, source apportionment and long-range transportation. *Atmospheric Environment*, 203, 1-3.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.046>

[8] Pandit, S., Sengupta, A., Kale, S., & Das, D. (2011). Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane.

- Bioresour Technolgy, 102(3), 2736-2744.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.038>
- [9] Lu, M., & Li, S. F.Y. (2012). Cathode reactions and applications in microbial fuel cells: A review. *Critical Reviews in Environmental Science Technolog*, 42(23), 2504-2525.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2011.592744>
- [10] Noori, M.T., Ghangrekar, M. M., & Mukherjee, C. K. (2016). V2O5 microflower decorated cathode for enhancing power generation in air-cathode microbial fuel cell treating fish market wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), 3638-3645.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.163>
- [11] Kodali, M., Santoro, C., Herrera, S., Serov, A., & Atanassov, P. (2017). Bimetallic platinum group metal-free catalysts for high power generating microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 366, 18-26.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.110>
- [12] Kim, S., Kato, S., Ishizaki, T., Li, O.L., & Kang, J. (2019). Transition Metal (Fe, Co, Ni) Nanoparticles on Selective Amino-N-Doped Carbon as High-Performance Oxygen Reduction Reaction Electrocatalyst. *Nanomaterials*, 9(5), 742.
<https://doi.org/10.3390/nano9050742>
- [13] Deng, L., Yuan, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Chen, Y., Yuan, H., & Chen, Y. (2017). Alfalfa leaf-derived porous heteroatom-doped carbon materials as efficient cathodic catalysts in microbial fuel cells. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9766-9773.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01585>
- [14] Zhang, L., Lu, Z., Li, D., Ma, J., Song, P., Huang, G., Liu, Y., & Cai, L. (2016). Chemically activated graphite enhanced oxygen reduction and power output in catalyst-free microbial fuel cells. *Journal of Cleaner Production*, 115, 332-336.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.067>
- [15] Wang, Z., Cao, C., Zheng, Y., Chen, S., & Zhao, F. (2014). Abiotic oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells. *ChemElectroChem*, 1(11), 1813–1821.
<https://doi.org/10.1002/celec.201402093>
- [16] Santoro, C., Arbizzani C., Erable B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225-244.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
- [17] Yuan, H., & He, Z. (2015). Graphene-modified electrodes for enhancing the performance of microbial fuel cells. *Nanoscale*, 7, 7022–7029.
<https://doi.org/10.1039/C4NR05637J>
- [18] Ren, P., Ci, S., Ding, Y., & Wen, Z. (2019). Molten-salt-mediated synthesis of porous Fe-containing N-doped carbon as efficient cathode catalysts for microbial fuel cells. *Applied Surface Science*, 481, 1206–1212.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.279>
- [19] Pan, Y., Mo, X., Li, K., Pu, L., Liu, D., & Yang, T. (2016). Iron-nitrogen-activated carbon as cathode catalyst to improve the power generation of single-chamber air-cathode microbial fuel cells. *Bioresour Technology*, 206, 285-289.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.112>
- [20] Pu, L., & Li, K. (2016). Inverse Spinel NiCo2S4 Nanoparticles Coated on Activated Carbon as an Electrocatalyst Applied in Air Cathode Microbial Fuel Cells. *The Electrochemical Society*, 01, 1832.
<https://doi.org/10.1149/MA2016-01/36/1832>
- [21] Wang, Z., Cao, C., Zheng, Y., Chen S., & Zhao, F. (2019). Hydrothermal synthesis of Fe-Mn bimetallic nanocatalysts as high efficiency cathode catalysts for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 414, 444–452.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.024>
- [22] Huang, Q., Zhou, P., Yang, H., Zhu, L., & Wu, H. (2017). In situ generation of inverse spinel CoFe₂O₄ nanoparticles onto nitrogen-doped activated carbon for an effective cathode electrocatalyst of microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 325, 466-473.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.079>
- [23] Ayyaru, S., Mahalingam S., & Ahn, Y. H. (2019). A non-noble V2O5 nanorods as an alternative cathode catalyst for microbial fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 4974-4984.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.021>

- [24] Yuan, H., Hou, Y., Abu-Reesh, I. M., Chen, J., & He, Z. (2016). Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: A review. *Materials Horizons*, 3, 382–401. <https://doi.org/10.1039/C6MH00093B>
- [25] Tang, H., Zeng, Y., Zeng, Y., Wang, R., Cai, S., Liao, C., Cai, H., Lu, X., & Tsiakaras, P. (2017). Iron-embedded nitrogen doped carbon frameworks as robust catalyst for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 550-556. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.09.062>
- [26] Hirooka, K., Ichihashi, O., & Takeguchi, T. (2018). Sodium cobalt oxide as a non-platinum cathode catalyst for microbial fuel cells. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 322-325. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.07.002>
- [27] Wu, Y., Wang, L., Jin, M., Kong, F., Qi, H., & Nan, J. (2019). Reduced graphene oxide and biofilms as cathode catalysts to enhance energy and metal recovery in microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 283, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.080>
- [28] Majidi, M. R., Farahani, F. S., Hosseini, M., & Ahadzadeh, I. (2019). Low-cost nanowired α -MnO₂/C as an ORR catalyst in air-cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 125, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.09.004>
- [29] Chiodoni, A., Salvador, G. P., Massaglia, G., Delmondo, L., Munoz-Tabares, J. A., Sacco, A., Garino, N., Castellino, M., Margaria, V., Ahmed, D., Pirri, C. F., & Quaglio M. (2019). Mn_xO_y- based cathodes for oxygen reduction reaction catalysis in microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(9), 4432-4441. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.064>
- [30] Lv, C., Liang, B., Zhong, M., Li, K., & Qi, Y. (2019). Activated carbon-supported multi-doped graphene as high-efficient catalyst to modify air cathode in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 304, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.094>
- [31] Zheng, S., Yang, F., Chen, S., Liu, L., Xiong, Q., Yu, T., Zhao, F., Schroder, U., & Hou, H. (2015). Binder-free carbon black/stainless steel mesh composite electrode for high-performance anode in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 284, 252-257. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.014>
- [32] Santoro, C., Kodali, M., Shamon, N., Serov, A., Soavi, F., Merino-Jimenez, I., Gajda, I., Greenman, J., Ieropoulos, I., & Atanassov, P. (2019). Increased power generation in supercapacitive microbial fuel cell stack using Fe–N–C cathode catalyst. *Journal of Power Sources*, 412, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.069>
- [33] Tang C. and Zhang Q.,(2016) Can Metal–Nitrogen–Carbon Catalysts Satisfy Oxygen Electrochemistry?. *J. Mater. Chem. A.*, 4, 4998–5001. <https://doi.org/10.1039/C6TA01062H>
- [34] Su Y., Jiang H., Zhu Y., Zou W., Yang X., Chen J. and Li C (2014). Hierarchical Porous Iron and Nitrogen Co-Doped Carbons As Efficient Oxygen Reduction Electrocatalysts In Neutral Media. *J. Power Sources*, 2014, 265, 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.140>
- [35] Wenmu L., Aiping Y., Higgins DC., Llanos BG., and Zhongwei C.* (2010). Biologically Inspired Highly Durable Iron Phthalocyanine Catalysts for Oxygen Reduction Reaction in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 132, 48, 17056–17058. <https://doi.org/10.1021/ja106217u>
- [36] Santoro, C., Serov, A., Gokhale, R., Rojas-Carbonell, S., Stariha, L., Gordon, J., Artyushkova, K., & Atanassov, P. (2017). A family of Fe-N-C oxygen reduction electrocatalysts for microbial fuel cell (MFC) application: Relationships between surface chemistry and performances. *Applied Catalysis B: Environmental*, 205, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.12.013>
- [37] Jiang, C., Yang, Q., Wang, D., Zhong, Y., Chen, F., & Li, X. (2017). Simultaneous perchlorate and nitrate removal coupled with electricity generation in autotrophic denitrifying biocathode microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 308, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.121>
- [38] Sotres, A., Cerrillo, M., Viñas, M., & Bonmatí, A. (2016). Nitrogen removal in a two-chambered microbial fuel cell: Establishment of a nitrifying–denitrifying

- microbial community on an intermittent aerated cathode. *Chemical Engineering Journal*, 284, 905–916.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.100>
- [39] Park, Y., Park, S., Nguyen, V., Yu, J., Torres, C., & Rittmann, B. (2017). Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 316, 673–679.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.005>
- [40] Santoro, C., Babanova, S., Erable, B., Schuler, A., Atanassov, P. (2016). Bilirubin oxidase based enzymatic air-breathing cathode: Operation under pristine and contaminated conditions. *Bioelectrochemistry*, 108, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2015.10.005>
- [41] Breheny, M., Bowman, K., Farahmand, N., Gomaa, O., Keshavarz, T., & Kyazze, G. (2019). Biocatalytic electrode improvement strategies in microbial fuel cell systems. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(7), 2081–2091.
<https://doi.org/10.1002/jctb.5916>
- [42] Christwardana, M., Kim, K. J. & Kwon, Y. (2016). Fabrication of mediatorless/membraneless glucose/ oxygen based biofuel cell using biocatalysts including glucose oxidase and laccase enzymes. *Scientific Reports*, 6, 1-10.
<https://doi.org/10.1038/srep30128>
- [43] Lai, C., Wu, C., Meng, C., & Lin, C. (2017). Decolorization of azo dye and generation of electricity by microbial fuel cell with laccase-producing white-rot fungus on cathode. *Applied Energy*, 188, 392–398.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.044>
- [44] Bi, L., Ci, S., Cai, P., Li, H., & Wen, Z. (2018). One-step pyrolysis route to three dimensional nitrogen-doped porous carbon as anode materials for microbial fuel cells. *Applied Surface Science*, 427, 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.030>
- [45] Tao, Y., Liu, Q., Chen, J., Wang, B., Wang, Y., Liu, K., Li, M., Jiang, H., Lu, Z., & Wang, D. (2016). Hierarchically three-dimensional nanofiber based textile with high conductivity and biocompatibility as a microbial fuel cell anode. *Environmental Science & Technology*, 50(14), 7889-7895.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00648>
- [46] Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 41, 3341-3346.
<https://doi.org/10.1021/es062644y>
- [47] Hou, J., Liu, Z., Yang, S., & Zhou, Y. (2014). Three-dimensional macroporous anodes based on stainless steel fiber felt for high-performance microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 258, 204-209.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.035>
- [48] Feng, Y., Yang, Q., Wang, X., Liu, Y., Lee, H., & Ren, N. (2011). Treatment of biodiesel production wastes with simultaneous electricity generation using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresour Technol*, 102(1), 411-415.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.099>
- [49] Zhu, N., Chen, X., Zhang, T., Wu, P., Li, P., & Wu, J., (2011). Improved performance of membrane free single-chamber air-cathode microbial fuel cells with nitric acid and ethylenediamine surface modified activated carbon fiber felt anodes. *Bioresour Technol*, 102(1), 422-426.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.046>
- [50] Guo, X., Jia, J., Dong, H., Wang, Q., Xu, T., Fu, B., Ran, R., Liang, P., Huang, X., & Zhang, X. (2019). Hydrothermal synthesis of Fe-Mn bimetallic nanocatalysts as high efficiency cathode catalysts for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 414, 444–452.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.024>
- [51] Kaewkannetra, P., Chiwes, W., & Chiu, T.Y. (2011). Treatment of cassava mill wastewater and production of electricity through microbial fuel cell technology. *Fuel*, 90, 2746-2750.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.031>
- [52] Zhang, Y., Mo, G., Li, X., Zhang, W., Zhang, J., Ye, J., Huang, X., & Yu, C. (2011). A graphene modified anode to improve the performance of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5402-5407.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.067>
- [53] Mehdinia, A., Ziaei, E., & Jabbari, A. (2014). Facile microwave-assisted synthesized reduced graphene oxide/tin oxide

- nanocomposite and using as anode material of microbial fuel cell to improve power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10724-10730.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.008>
- [54] Yang, W., Lu, J. E., Zhang, Y., Peng, Y., Mercado, R., Li, J., Zhu, X., & Chen, S. (2019). Cobalt oxides nanoparticles supported on nitrogen-doped carbon nanotubes as high-efficiency cathode catalysts for microbial fuel cells. *Inorganic Chemistry Communications*, 105,69–75.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2019.04.036>
- [55] Xu, G., Zheng, X., Lu, Y., Liu, G., Luo, H., Li, X., Zhang, R., & Jin, S. (2019). Development of microbial community within the cathodic biofilm of single-chamber air-cathode microbial fuel cell. *Science of the Total Environment*, 665, 641–648.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.175>
- [56] Li, M., Zhong, K., Zhang, L., Wang, S., Zhang, H., Huang, Y., Chen, S., Mai, H., & Zhang, N. (2019). Cobalt-based catalysts modified cathode for enhancing bioelectricity generation and wastewater treatment in air-breathing cathode microbial fuel cells. *Electroanalysis*, 31, 1– 13.
<https://doi.org/10.1002/elan.201900161>
- [57] Tatinclaux, M., Gregoire, K., Leininger, A., Biffinger, J. C., Tender, L., Ramirez, M., Torrents, A., & Kjellerup, B. V. (2018). Electricity generation from wastewater using a floating air cathode microbial fuel cell. *Water-Energy Nexus*, 1(2),97–103.
<https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.09.001>

İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasıyla Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Çalışması

Salih ERMİŞ^{1*}  Ramazan BAYINDIR²  Mehmet YEŞİLBUDAK³ 

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

³Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 12/04/2023
Revision: 21/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Power systems
Voltage stability
Power flow
Optimization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/04/2023
Düzeltilme: 21/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Gerilim kararlılığı
Güç akışı
Optimizasyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Today, the demand for electrical energy is constantly increasing. Due to this increasing demand, instability problems occur in power systems. The instability problem has become an important problem that needs to be solved for the safe, efficient and effective operation of power systems. (Günümüzde elektrik enerjisine olan talep sürekli artmaktadır. Bu artan talepten dolayı güç sistemlerinde kararsızlık problemleri oluşmaktadır. Kararsızlık problemi, güç sistemlerinin güvenli, verimli ve etkili çalışabilmesi için çözülmesi gereken önemli bir sorun haline gelmiştir.)

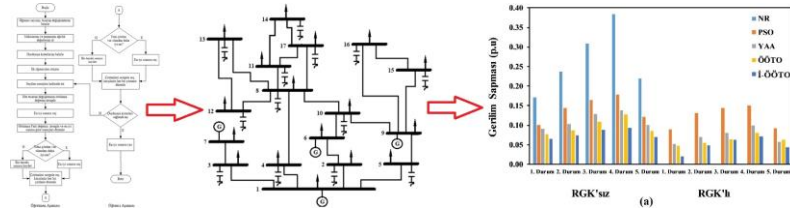


Figure A: The Block diagram of the developed algorithm, single line diagram and analysis result graphics. / **Şekil A:** Geliştirilen algoritmanın blok diyagramı, tek hat şeması ve analiz sonucu grafikleri.

Highlights (Önemli noktalar)

- I-TLBO algorithm has been proposed as a new solution method. / Yeni bir çözüm metodu olarak İ-ÖÖTO algoritması önerilmiştir.
- TLBO and I-TLBO algorithms have been tested on IEEE 14 bus power systems and 17 bus power systems created in Istanbul, Turkey. / ÖÖTO ve İ-ÖÖTO algoritmaları IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul bölgesinde oluşturulan 17 baralı güç sistemleri üzerinde test edilmiştir.
- The I-TLBO algorithm offers a better solution for voltage instability problems in power systems. / İ-ÖÖTO algoritması güç sistemlerinde gerilim kararlılığı problemlerinde daha iyi bir çözüm sunar.

Aim (Amaç): In order to minimize voltage instability in power systems, optimal power flow (OGA) has been realized with the I-TLBO algorithm. / Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını minimuma indirmek için İ-ÖÖTO algoritmasıyla optimal güç akışı (OGA) gerçekleştirilmiştir.

Originality (Özgünlük): With this study, the voltage instability problem has been minimized by developing the original TLBO algorithm with I-TLBO algorithm. / Bu çalışma ile orjinal ÖÖTO algoritması geliştirilerek İ-ÖÖTO algoritmasıyla gerilim kararlılığı problemi minimuma indirilmiştir.

Results (Bulgular): As a result of the analyzes made, the I-TLBO algorithm, which was developed, gave better results in solving the voltage instability problem compared to other algorithms used in the literature. / Yapılan analizler sonucunda geliştirilen İ-ÖÖTO algoritması literatürde kullanılan diğer algoritmalara göre gerilim kararlılığı problemi çözümünde daha iyi sonuçlar vermiştir.

Conclusion (Sonuç): With the developed I-TLBO algorithm, it has presented a new and effective solution to the literature in solving the voltage instability problem in power systems. / Geliştirilen İ-ÖÖTO algoritması ile güç sistemlerinde gerilim kararlılığı probleminin çözümünde literature yeni ve etkili bir çözüm sunmuştur.



İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasıyla Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Çalışması

Salih ERMİŞ^{1*} Ramazan BAYINDIR² Mehmet YEŞİLBUDAK³

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

³Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/04/2023
Düzeltilme: 21/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Gerilim kararlılığı
Güç akışı
Optimizasyon

Öz

Bu çalışmada, son yıllarda kullanılan öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması (ÖÖTO) üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve güç sistemlerinde gerilim kararlılığı için yeni bir optimizasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. İyileştirilen öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (İ-ÖÖTO) algoritması, IEEE 14 baralı güç sistemi ve Türkiye, İstanbul Anadolu yakasında 17 baralı gerçek bir güç sistemi kullanılarak test edilmiştir. Bu güç sistemlerinde, beş farklı durum (temel durum, temel durumda talep edilen yükün %20, %40 ve %60 artışı ve hat kesintisi) oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Sonrasında, yük baralarına şönt reaktif güç kompensatörleri (RGK) bağlanarak gerilim kararlılığı açısından etkisi incelenmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, elde edilen sonuçlar, orijinal ÖÖTO algoritması ve literatürde sıklıkla kullanılan yerçekimi arama algoritması (YAA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve Newton-Raphson güç akışı yönetimleriyle karşılaştırılmıştır. İ-ÖÖTO algoritması, tüm çalışma koşullarında diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamıştır.

Voltage Stability Study In Power Systems With Improved Teaching-Learning Based Optimization Algorithm

Article Info

Research article
Received: 12/04/2023
Revision: 21/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Power systems
Voltage stability
Power flow
Optimization

Abstract

In this study, improvements have been made on the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm, which has been used in recent years, and a new optimization application has been carried out for the voltage stability in power systems. The improved teaching-learning based optimization (I-TLBO) algorithm has been tested using an IEEE 14 bus power system and a real 17 bus power system on the Anatolian side of Istanbul, Turkey. In these power systems, five different conditions (base case, 20%, 40% and 60% increase of the demanded load in the base case and line outage) were created and analyzed. Afterwards, shunt reactive power compensators (RGK) are connected to the load buses and their effect in terms of voltage stability is examined. In order to evaluate the effectiveness of the I-TLBO algorithm, the obtained results were compared with the original TLBO algorithm and the gravity search algorithm (GSA), particle swarm optimization (PSO) and Newton-Raphson power flow methods, which are frequently used in the literature. The I-TLBO algorithm outperformed other methods in all operating conditions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemleri, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımını içine alan çok geniş yapılardır. Teknolojideki gelişmeler, endüstriyel talep ve nüfus artışı gibi nedenlerden dolayı elektrik enerjisine talep gün ve gün artmaktadır. Güç sistemlerindeki bu genişleme ve talep artışı, sistemler üzerinde

kararsızlık durumlarına neden olmaktadır. Kararsızlık problemi, güç sistemlerinin güvenli, verimli ve etkili çalışabilmesi için bir önceki yüzyılım başlarından itibaren çözülmesi gereken önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu problemlerin en başında da gerilim kararsızlığı gelmektedir [1-4].

Gerilim kararsızlığı, güç sistemlerinde elektrik kesintilerine neden olmakta ve buna bağlı olarak büyük yük kayıplarına yol açmaktadır [5]. Her geçen gün genişleyen güç sistemlerindeki yük talepleri, sistemlerin etkin ve verimli çalışmasında büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Güç sistemlerinin etkili, verimli ve güvenilir olmasının en önemli unsuru; sistemdeki kararsızlık probleminin olmamasına bağlıdır. Kararsızlık probleminin ortadan kaldırılması, güç sistemlerinde birçok sorunu ortadan kaldıracaktır [6]. Bu nedenle, kararsızlık nedenlerinin ve çözümlerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Güç sistemlerinde kararsızlığın sınıflandırılması, problem çözümleri için daha hızlı sonuçlar verebilir. Kararsızlık türünün belirlenmesi ve uygun analitik çözümlerin geliştirilmesi kararsızlık problemini ortadan kaldırmaya veya minimize etmeye yardımcı olur. Bu bağlamda, kararsızlık problemi güç sistemlerinde üç ana başlık altında ifade edilmektedir [4]. Bunlar; rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olarak tanımlanır.

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı, elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımının her kademesinde verimli, kaliteli ve sürekliliğin sağlanabilmesi için çözülmesi gereken bir problemdir. Bu sorunu çözmek için kararsızlığa neden olan olguların tespit, analiz ve çözümlenmesi en iyi bir şekilde yapılmalıdır.

Literatürde gerilim kararlılığı ile ilgili pek çok tanım mevcuttur. Örneğin; güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, sistemde oluşan bozucu bir etki sonrasında nominal çalışma koşullarını sağlaması olarak tanımlanabilir. Gerilim kararlılığı problemi, yükün, üretim talebini sağlayıp sağlayamamasına bağlı olarak ortaya çıkan bir durumdur. Gerilim kararlılığı, en anlaşılabilir tanımıyla, bara gerilimlerini belirlenen sınırlar içinde tutabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, aktif ve reaktif güç dengesini, yük ile üretime bağlı olarak sağlayabilme kabiliyetine dayanır. Aktif ve reaktif güç arasındaki dengesizlik, bara gerilimlerinde artışlara veya düşüslere neden olabilir. Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı; sistem üzerinde elektrik kesintilerinden, yük kaybı ve hat açılmasına, koruyucu ekipmanların devre dışı kalmasından, generatör senkronizasyon kaybına kadar birtakım sonuçlara neden olabilir [7].

Araştırmacılar tarafından güç sistemlerinde gerilim kararlılığı konusunda çok sayıda çalışma

önerilmiştir. *Onksakul ve Jirapong* evrimsel algoritmayla FACTS cihaz lokasyonu, yük baralarında aktif güç ve bara gerilimleri optimizasyonunu sunmuşlardır [8]. *Ravi ve Duraiswamy*, güç sistemi kararlılığı için genetik algoritma ve yapay arı kolonisi algoritması ile yeni bir çözüm önermişlerdir [9]. *Deepa ve Rizwana*, modifiye parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanarak güç sistemlerinde aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltma çözümü önermişlerdir [10]. *Akachukwu ve ark.*, genetik algoritma kullanarak güç sistem optimizasyonu için bir çalışma yapmışlardır [11]. *Chen ve ark.*, çok amaçlı gelişmiş parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanarak aktif güç kaybı ve gerilim sapması değerini en aza indirme çalışması gerçekleştirmişlerdir [12]. *Singh ve Srivastava*, optimal reaktif güç kontrolü için hibrit bir PSO algoritması önermişlerdir [13]. *Amrane ve ark.*, iki evrimsel arama algoritması ile hibrit yöntem geliştirerek gerilim kararlılığını ve iletim güç kayıplarının kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [14]. *Li ve ark.*, diferansiyel evrim algoritmasını kullanarak güç sistemlerinde toplam yakıt maliyeti, emisyon, toplam aktif güç kaybı, gerilim kararlılığı vb. değerleri incelemişlerdir [15].

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, enerjinin üretimden son kullanıcıya kadar kaliteli, sürekli ve güvenli bir şekilde verilebilmesi için çalışılması gereken en etkili alanlardan biridir [14]. Bu çalışmada, güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problemini çözmek ve optimizasyonunu gerçekleştirmek için çeşitli yöntemler, metasezgisel algoritmalar ve uygulamalar ele alınmıştır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'tan elde edilen veriler kapsamında Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı gerçek bir güç sistemi [16] tasarlanmıştır. Gerilim kararlılığı optimizasyonu için tasarlanan bu 17 baralı güç sistemi ve standart IEEE 14 baralı güç sistemi, literatürdeki PSO, YAA ve orijinal ÖÖTO algoritmaları ile bu çalışmada üzerinde düzenlemeler yapılmış İ-ÖÖTO algoritması aracılığıyla analiz edilmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının, gerilim kararlılığı optimizasyonu bakımından literatürde kullanılan diğer yöntemlerden daha etkin olduğu gösterilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde ele alınmaktadır: İkinci bölümde, problemin formülasyonu ve problemin açıklanması sunulmuştur. Üçüncü bölümde, gerilim kararlılığı optimizasyon algoritmaları, orijinal ÖÖTO'nun formülasyonu ve önerilen strateji açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, simülasyon sonuçları ve karşılaştırmaları ele alınmaktadır. Son olarak, makaleye dair sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Problem Formülasyonu (Problem Formulation)

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problem çözümlerindeki temel amaç; optimal güç akışı (OGA) yöntemiyle güç sistemi kontrol parametrelerini en iyi şekilde belirleyerek bazı eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamalarına maruz kalan belirli hedefleri azaltmaktır [17, 18]. OGA probleminin genel matematiksel formu şu şekilde elde edilebilir:

$$\min F(x, u) \quad (1)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

$$u \in U \quad (4)$$

Burada, F amaç fonksiyonu, x bağımlı değişken vektörü ve u kontrol değişkeni vektörüdür.

x , bağımlı değişkeni Eş. 5'e göre ifade edilebilir.

$$x^T = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{LNL}, Q_{G1} \dots Q_{GNG}, S_{11} \dots S_{INTL}] \quad (5)$$

Burada, NL yük baraları numarası, NG generatörlerin numarası, NTL iletim hat numarası, P_{G1} salınım barası aktif güç çıkışı, V_L yük barası gerilimleri, Q_G generatör reaktif güç çıkışı ve S_l iletim hattı yükleri olarak ifade edilmektedir.

u , kontrol değişkeni Eş. 6'ya göre ifade edilebilir.

$$u^T = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}, T_1 \dots T_{NT}] \quad (6)$$

Burada, NT transformatör numarası, NC şönt reaktif güç kompensatör numarası, V_G generatör barası gerilimleri, P_G salınım barası (P_{G1}) dışındaki generatör güç çıkış değerleri, Q_c şönt reaktif güç kompensatör değerleri ve T transformatör kademe ayarları olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik kısıtlamaları

Güç sistemlerinde, aktif ve reaktif güçlerin üretim, tüketim ve kayıp güç toplamı 0 (sıfır) olmak zorundadır ve bu zorunluluk aşağıda Eş. 7 ve Eş. 8 şeklinde ifade edilmiştir.

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0, \quad i \in N \quad (7)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0, \quad i \in N_L \quad (8)$$

Burada, N_i , bara hat sayısı, N_L yük bara sayısı, P_{Gi} i . generatör aktif gücü, Q_{Gi} i . generatör reaktif gücü P_{Li} i . yük bara aktif gücü, Q_{Li} i . yük bara reaktif gücü, G_{ij} Y-bara matrisi reel değeri ve B_{ij} Y-bara matrisi imajiner değerini ifade eder.

Eşitsizlik kısıtlamaları

Eşitsizlik kısıtlamaları, güç sistemlerindeki generatör, transformatör ve güvenlik sınırlamaları olarak isimlendirilir.

Generatör kısıtlamaları, gerilim, aktif ve reaktif güç sınırlarından oluşmaktadır.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_G \quad (9)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_G \quad (10)$$

Transformatör kademe sınırları Eş. 11'de verilmiştir.

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_T \quad (11)$$

Yük bara gerilim genlikleri Eş. 12 ile tanımlanmıştır.

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_L \quad (12)$$

2.2. Problemin Açıklanması (Description of the Problem)

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problemini çözmek için iki hedef tanımlanmıştır. Birincisi, aktif güç kayıplarının minimizasyonu, ikincisi ise, gerilim sapma değerinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir.

Aktif güç kayıplarının minimizasyonu ($P_{Kayıp}$)

verilmiştir.

Aktif güç kayıplarının minimizasyonu Eş. 13'de ifade edilmiştir.

$$\min f_1 = \min P_{Kayıp} = \sum_{k \in N_L} g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}), \quad k \in N_L \quad (13)$$

Burada $P_{Kayıp}$, toplam aktif güç kaybı, g_k k . hat iletkenliği, δ_{ij} bara gerilim açısı farkı ve V_i ve V_j sırasıyla i . ve j . bara gerilim değerlerini tanımlar.

Gerilim sapmasının minimizasyonu (V_d)

$$X_{i,j} = X_j^{min} + ri(X_j^{max} - X_j^{min}) \quad (16)$$

Burada, ri (0,1) aralığında rastgele değişkeni temsil eder.

Öğretmen Aşaması

M^g , her konu için sınıftaki öğrencilerin ortalamasını içeren ortalama parametre Eş. 17'de verilmiştir.

$$M^g = [M_1^g, M_2^g, M_3^g, \dots, M_j^g, \dots, M_D^g] \quad (17)$$

Yük baralarındaki toplam gerilim sapması Eş. 14'de belirtilmiştir.

$$\min f_2 = \min V_d = \sum_{y=1}^{N_y} |V_y - 1| \quad (14)$$

Burada, V_d toplam gerilim sapması, V_y y . yük bara gerilimini ifade eder.

$X_{\text{öğretmen}}^g$, sınıftaki minimum amaç fonksiyonuna sahip en iyi bilen öğrenci, o iterasyon için öğretmen olarak atanır. Bu aşamada algoritma, öğrencilerin ortalamasını öğretmene doğru yönlendirerek iletir. Mevcut ortalama ve istenen ortalama vektörlerden rastgele ağırlıklandırılmış bir diferansiyel vektör oluşturulur ve yeni bir geliştirilmiş öğrenci seti elde etmek için mevcut öğrenen popülasyonuna eklenir [20].

2.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon

Algoritması (ÖÖTO) (Teaching-Learning Based Optimization Algorithm (ÖÖTO))

$$X_{yeni,i}^g = X_i^g + ri(X_{\text{öğretmen}}^g - T_F M^g) \quad (18)$$

ÖÖTO algoritması, son zamanlarda Rao ve ark. tarafından önerilen çok ilginç bir popülasyona dayalı optimizasyon yaklaşımıdır [19, 20]. Önerilen algoritma öğretme-öğrenme sürecine dayanmaktadır. Önerilen algoritmada, her bir aday çözüm, farklı konulardaki notlardan oluşan, bir öğrencinin sonuçlarını temsil eden bir dizi değişkenle karakterize edilir. Öğrenciler, öğretmenlerden bilgi alarak sonuçlarını iyileştirmeye çalışırlar ve bu süreç, ÖÖTO algoritmasında öğretmen aşaması olarak adlandırılır. Aynı zamanda diğer öğrencilerle karşılıklı etkileşim kurarak performanslarını da geliştirirler. Bu öğrenci aşaması olarak adlandırılır. ÖÖTO algoritmasının bu iki temel işleminin kısa bir açıklaması aşağıda yapılmıştır.

T_F , her yinelemede 1 veya 2 olmak üzere rastgele alınan bir öğretim faktörüdür. T_F , Eş. 19'da tanımlanmıştır.

$$T_F = \text{round}[1 + ri(0,1)\{1,2\}] \quad (19)$$

X_i^g , g . nesildeki i . parametre Eş. 15'de verilmiştir.

Öğrenci Aşaması

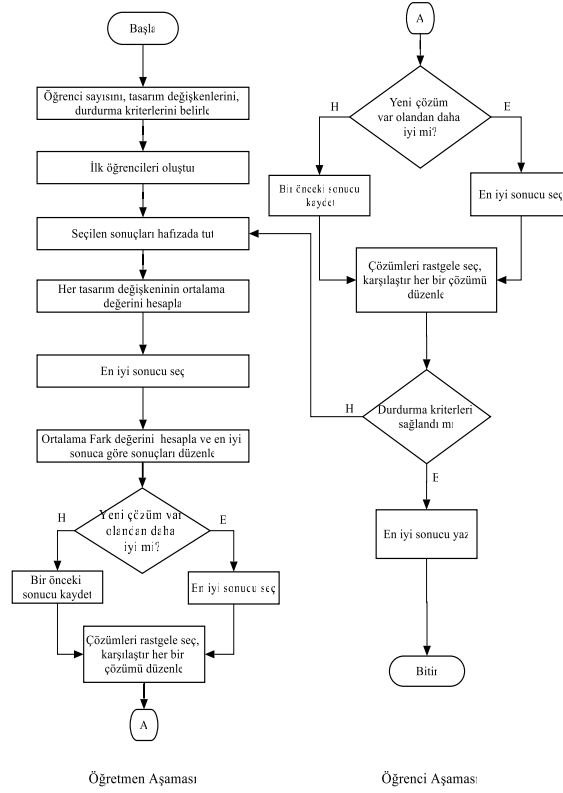
Bu aşama, öğrencilerin birbirleriyle etkileşiminden oluşur. Karşılıklı etkileşim süreci öğrencinin bilgisini artırma eğilimindedir. Her öğrenci, diğer öğrencilerle rastgele etkileşime girer ve bu nedenle bilgi paylaşımını kolaylaştırır [20]. Eş. 20'de öğrenci aşamasındaki $X_{yeni,i}^g$ matrisinin i . parametere değeri verilmiştir.

$$X_i^g = [x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, x_{i,3}^g, \dots, x_{i,j}^g, \dots, x_{i,D}^g] \quad (15)$$

$$X_{yeni,i}^g = \begin{cases} X_i^g + ri(X_i^g - X_r^g) \\ \text{eğer } f(X_i^g) < f(X_r^g) \\ X_i^g + ri(X_r^g - X_i^g) \end{cases} \quad (20)$$

Başlangıçta, arama alanı içinde rastgele oluşturulmuş N satır ve D sütundan oluşan bir matrisi ifade eder. Burada, N sınıf kapasitesini ve D ders sayısını gösterir. $X_{i,j}$ değeri Eş. 16'da

Burada, belirli bir öğrenci X_i^g için diğer bir öğrenen X_r^g rastlantısal seçilir ($i \neq r$). ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. ÖÖTO algoritmasının akış şeması. (Flow chart of the TLBO algorithm.)

2.4. İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (İ-ÖÖTO)

(Improved teaching-learning based optimization (I-TLBO) algorithm)

Bu çalışmada, ÖÖTO'daki Eş. 18 ve Eş. 20'e "ağırlık faktörü" olarak belirlenen w parametresi eklenmiştir. Klasik ÖÖTO'da bir önceki öğrenci değerine göre yeni öğrenci değeri alınırken, düzenlenen İ-ÖÖTO algoritmasında önceki değerin ağırlık vektörü tarafından karar verilen bir değeri alınır.

ÖÖTO algoritmasıyla, bireylerin, iterasyonun ilk safhasında arama alanındaki belirli bölgelerin çözümlenmesi gerekmektedir. Daha sonraki aşamalarda optimizasyon sonuçlarının çok iyi bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Böylece, hedeflenen optimumluğun bulunduğu dar bir bölgenin içinde çözümlenmeyi tamamlar. Bu hedefe ulaşmak için daha önceden tespit edilmiş w (ağırlık faktörü) değeri, maksimum değerden minimum değere lineer olarak azaltılır.

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{MAXIT} \right) \times i \quad (21)$$

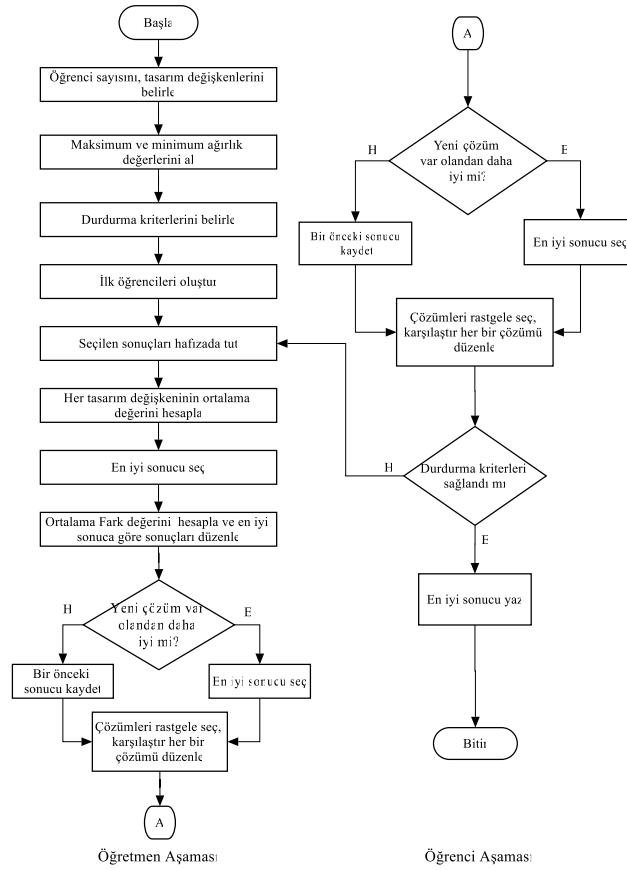
Burada, w_{max} ve w_{min} ağırlık faktörünün en yüksek ve en düşük değerleridir. i iterasyon değeridir, ağırlık faktörünün maksimum ve minimum değerleri 0 ile 1 aralığında değerler alırlar. Ağırlık faktörü değerleri, $w_{max} > w_{min}$

koşulunu sağlamak zorundadır. Ağırlık faktörü değeri, Eş. 18 ve Eş. 20'deki denklemlere eklendiğinde Eş. 22 öğretmen aşamasında, Eş. 23 öğrenci aşamasında aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$X_{yeni,l}^g = w \times X_i^g + ri(X_{\text{öğretmen}}^g - T_F M^g) \quad (22)$$

$$X_{yeni,i}^g = \begin{cases} w \times X_i^g + ri(X_i^g - X_r^g) \\ \text{eğer } f(X_i^g) < f(X_r^g) \\ w \times X_i^g + ri(X_r^g - X_i^g) \end{cases} \quad (23)$$

Orjinal ÖÖTO algoritması, öğretmen ve öğrencileri rastgele belirlemektedir. İterasyon arttıkça çözüm değerlerine göre ağırlık katsayılarıyla öğretmen ve öğrenci değerleri değişiklik arz etmektedir. Düzenlenen İ-ÖÖTO algoritmasında bu değerleri önceden tespit ederek ÖÖTO algoritmasına göre optimum sonuçlara, daha az iterasyonla ve en iyi çözümlere ulaşması için yeni bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Öğrenci sayısının az ya da çok olması ÖÖTO algoritmasında çalışma zamanını da olumsuz etkilemektedir. Öğrenci sayısı azaldıkça iterasyon süresi artmakta, öğrenci sayısı arttıkça iterasyon süresi azalmaktadır. Bu durumda da bazı çözümlerde hedeflenen en iyi sonuçlar elde edilememektedir. Bu çalışmada, yapılan analizler sonucunda öğrenci sayısı 25 olarak belirlenmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. İ-ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı (Flow diagram of I-TLBO algorithm)

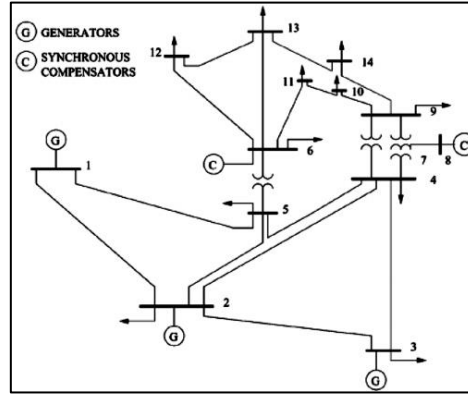
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Bu çalışmada, algoritma çözümlerine referans almak amacıyla IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sistemleri kullanılarak klasik Newton-Raphson (NR) yöntemiyle OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. Yeşilbudak ve ark. [21], klasik metodlar içerisinde Newton-Raphson yönteminin OGA çözümlerinde en iyi sonuçları sağladığını belirtmişlerdir. Ek olarak, PSO, YAA ve ÖÖTO algoritmaları da kullanılarak OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, güç sistemlerindeki bara gerilimleri, generatör üretim güçleri ve hatların aktif güç kayıpları bulunmuştur. Son olarak, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritması belirlenen güç sistemleri için kullanılarak OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. NR yöntemi ve diğer algoritma sonuçları karşılaştırılmış, optimum sonuçlar, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritmasıyla elde edilmiştir. Tüm analizler, Intel Core(TM) i7-2620 2.7GHz ve 8.00 (64 bit) Gb Ram özelliklerine sahip PC kullanılarak Matlab R2017b programında çözümlenmiştir. Her

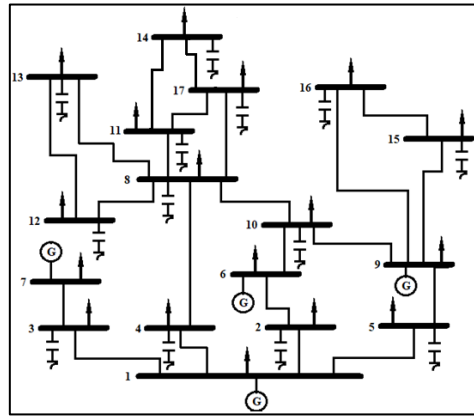
algoritma 100 iterasyon ve 30'ar kez çalıştırılmıştır. Bu çalışmada amaç; gerilim kararlılığını, aktif güç kaybını ve yük bara gerilim sapmasını minimize ederek sağlayabilmektir. Bu amaca, generatör üretim değerleri optimize edilerek ulaşılmıştır. Sunulan algoritmalar güç sistemleri üzerinde aşağıda belirtilen çeşitli senaryolar oluşturularak çalıştırılmıştır.

- Durum 1: Temel Durum
- Durum 2: Bara yük değerinde %20 artış
- Durum 3: Bara yük değerinde %40 artış
- Durum 4: Bara yük değerinde %60 artış
- Durum 5: 1-5 nolu hat devre dışı kalırsa

Yapılan analizlerde, güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağlamak için iki farklı yöntem izlenmiştir. İlk yöntem, güç sisteminde talep edilen reaktif gücün generatörler tarafından karşılanması (RGK'sız durum) ve ikinci yöntem, generatör reaktif gücüyle birlikte yük baralarına şönt reaktif güç kompensatörleri bağlanarak (RGK'lı durum) reaktif güç desteği sağlanmasıdır.



Şekil 3. IEEE 14 baralı güç sisteminin tek hat şeması [22] (Single line diagram of IEEE 14 bus power system)



Şekil 4. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sisteminin tek hat şeması [16] (Single line diagram of 17 bus power system of Istanbul-Anatolian side)

3.1 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Simulation Results)

IEEE 14 ve İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sistemleri için tüm senaryo durumlarında RGK bağlanmadan ve RGK bağlandıktan sonra algoritmaların gerilim sapması değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada amaç, gerilim sapması değerini 0 (Sıfır) en yakın değer elde ederek bara gerilim değerlerini nominal değerde tutmaktır. Gerilim

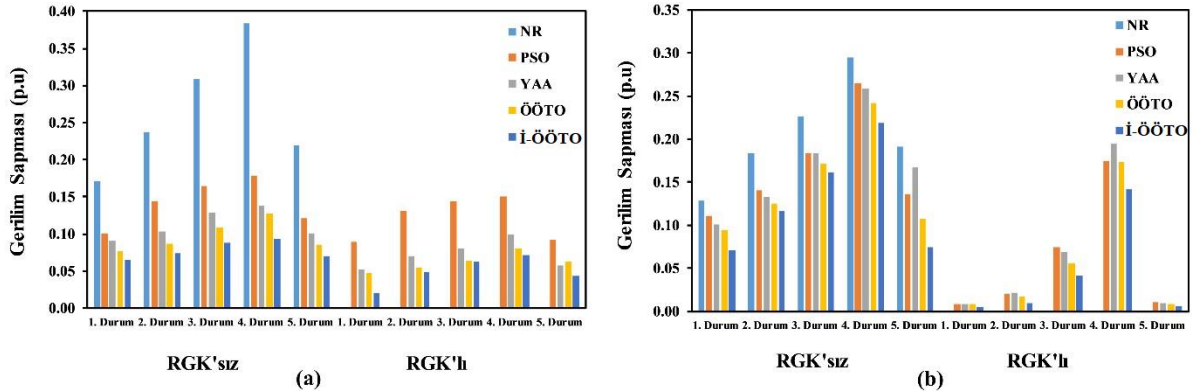
sapması değeri, RGK'lı durumda, RGK'sız durumu göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. RGK'sız durumda, generatörler tarafından üretilen reaktif güç, yük tarafından talep edilen reaktif gücü karşılayamamıştır. RGK'lı durumda paralel bağlanan kompensatörler generatörlere ek olarak reaktif güç desteği vererek yük baralarındaki gerilim değerini nominal değerlerde tutmayı sağlamıştır.

Tablo 1. Çalışma durumlarına göre algoritmaların gerilim sapması değerleri. (Voltage deviation values of algorithms according to operating conditions.)

		IEEE 14 Bara					İstanbul-Anadolu Yakası 17 Bara				
		NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO	NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO
RGK' sız	1. Durum	0,171	0,101	0,091	0,076	0,065	0,128	0,111	0,101	0,094	0,071
	2. Durum	0,237	0,144	0,103	0,087	0,074	0,183	0,140	0,133	0,125	0,116
	3. Durum	0,308	0,164	0,129	0,109	0,088	0,227	0,183	0,183	0,171	0,161
	4. Durum	0,384	0,178	0,138	0,128	0,093	0,295	0,265	0,258	0,242	0,219
	5. Durum	0,220	0,121	0,101	0,085	0,070	0,191	0,136	0,167	0,107	0,075
RGK' lı	1. Durum		0,090	0,053	0,047	0,020		0,008	0,008	0,008	0,005
	2. Durum		0,132	0,070	0,055	0,049		0,021	0,022	0,017	0,010
	3. Durum		0,144	0,081	0,064	0,062		0,074	0,069	0,056	0,041
	4. Durum		0,151	0,100	0,081	0,071		0,175	0,194	0,174	0,142
	5. Durum		0,092	0,058	0,062	0,044		0,011	0,009	0,008	0,006

Şekil 5-a-b’de görüleceği üzere tüm senaryo durumları analizlerinde toplam gerilim sapması sıfıra en yakın algoritma İ-ÖÖTO algoritmasıyla gerçekleşmiştir. NR, PSO, YAA ve ÖÖTO

algoritmaları, gerilim sapması değerleri açısından, tasarlanan İ-ÖÖTO’ya göre daha yüksek değerler vermiştir.



Şekil 5. Tüm durumlar için algoritmaların toplam gerilim sapması değerlerinin karşılaştırılması. a- IEEE 14 baralı, b- İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı. (Comparison of the total voltage deviation values of the algorithms for all cases. a- IEEE 14 bus, b- Istanbul-Anatolian side 17 bus).

Yapılan analizlerin temel durum sonuçlarına göre, toplam gerilim sapması, IEEE 14 baralı sistemde, RGK’sız durumda, İ-ÖÖTO algoritması NR’ye göre %61,98, PSO’ya göre %35,64, YAA’ya göre %28,57, ÖÖTO’ya göre %14,47 oranında az, RGK’lı durumda, İ-ÖÖTO algoritması PSO’ya göre %77,77, YAA’ya göre %62,26, ÖÖTO’ya göre %57,44 oranında az olduğu görülmüştür. Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, İ-ÖÖTO algoritması RGK’sız durumda NR’ye göre %44,5, PSO’ya göre %36,03, YAA’ya göre %29,7,

ÖÖTO’ya göre %24,46 oranında az, RGK’lı durumda PSO, YAA ve ÖÖTO’ya göre %37,5 oranında az değer göstermiştir. Tüm sonuçlara göre İ-ÖÖTO algoritmasının, klasik yöntem ve diğer optimizasyon algoritmalarına göre optimum sonucu verdiği görülmektedir.

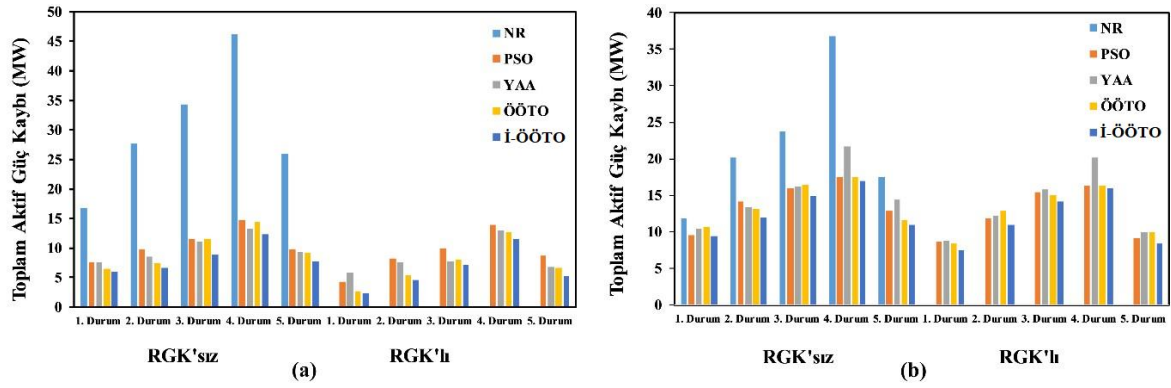
Yük artışı ve hat kesinti durumlarında gerilim sapması değerinin arttığı görülmektedir. Hat kesintisi oluştuğunda gerilim sapması değeri sıfırdan uzaklaşmaktadır.

Tablo 2. Çalışma durumlarına göre algoritmaların toplam aktif güç kayıp değerleri (Total active power loss values of algorithms according to operating conditions)

		IEEE 14 Bara					İstanbul-Anadolu yakası 17 Bara				
		NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO	NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO
RGK’ sız	1. Durum	16,738	7,507	7,650	6,434	5,997	11,81	9,548	10,43	10,72	9,404
	2. Durum	27,729	9,755	8,495	7,443	6,684	20,09	14,11	13,34	13,18	11,94
	3. Durum	34,357	11,510	11,051	11,500	8,882	23,76	15,88	16,25	16,43	14,93
	4. Durum	46,119	14,762	13,338	14,429	12,327	36,71	17,51	21,72	17,51	16,91
	5. Durum	25,954	9,823	9,379	9,109	7,725	17,44	12,92	14,4	11,62	10,97
RGK’ lı	1. Durum		4,286	5,787	2,730	2,295		8,605	8,729	8,345	7,484
	2. Durum		8,203	7,577	5,356	4,609		11,87	12,19	12,9	10,94
	3. Durum		9,900	7,747	8,038	7,150		15,4	15,81	14,99	14,11
	4. Durum		13,884	12,890	12,603	11,577		16,27	20,19	16,28	15,91
	5. Durum		8,745	6,847	6,634	5,198		9,151	9,98	9,865	8,423

Toplam aktif güç kayıpları sonuçları Tablo 2’de ve grafik değerleri Şekil 6-a-b’de verilmiştir. Tüm analiz sonuçlarına göre, İ-ÖÖTO algoritması diğer çözüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha az

aktif güç kaybına sahip olduğu görülmektedir. Temel duruma göre, yük artışı ve hat kesintileri aktif güç kayıplarını da arttırmaktadır.



Şekil 6. Tüm durumlar için toplam aktif güç kayıplarının karşılaştırılması. a-IEEE 14 baralı, b-İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı (Comparison of total active power losses for all cases. a-IEEE 14 bus, b-Istanbul-Anatolian side 17 bus.)

Yapılan analizlerin temel durum sonuçlarına göre, aktif güç kayıpları, IEEE 14 baralı sistemde, RGK'sız durumda, İ-ÖÖTO algoritmasında NR'ye göre %3,90 oranında azalmıştır. İ-ÖÖTO algoritması RGK'sız ve RGK'lı durumda sırasıyla PSO'ya göre %0,57 ve %0,76, YAA'ya göre %0,62 ve %1,32, ÖÖTO'ya göre %0,16 ve %0,17 oranında düşük olduğu hesaplanmıştır. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, RGK'sız durumda, İ-ÖÖTO algoritması NR'ye göre %0,28 oranında azalmıştır. İ-ÖÖTO algoritması, RGK'sız ve RGK'lı durumda sırasıyla PSO'ya göre %0,02 ve %0,13, YAA'ya göre %0,12 ve %0,14, ÖÖTO'ya

göre %0,15 ve %0,10 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Oranlardan da anlaşılacağı gibi, İ-ÖÖTO algoritması diğer tüm algoritmalara göre aktif güç kaybı minimizasyonu açısından üstünlüğünü göstermiştir.

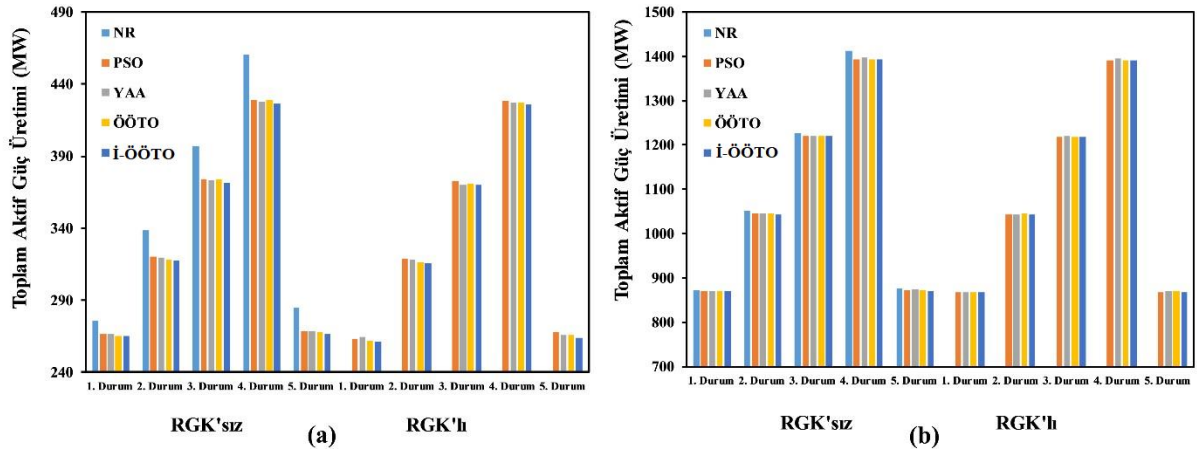
Çalışma durumlarına göre generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Şekil 7-a-b'ye göre karşılaştırıldığında, güç sistemlerinde talep edilen yük değeri arttıkça, generatör aktif güç üretim değerinin de arttığı görülmektedir. Hat kesinti durumlarında da aktif güç üretim değeri artmaktadır.

Tablo 2. Çalışma durumlarına göre algoritmaların generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri (The total active power generation values of the generators of the algorithms according to the operating conditions.)

		IEEE 14 Bara					İstanbul-Anadolu Yakası17 Bara				
		NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO	NR	PSO	YAA	ÖÖTO	İ-ÖÖTO
RGK'sız	1. Durum	275,738	266,507	266,65	265,434	264,997	871,407	869,145	870,024	870,314	869,002
	2. Durum	338,529	320,555	319,295	318,243	317,484	1051,604	1045,626	1044,858	1044,696	1043,459
	3. Durum	396,957	374,11	373,651	374,1	371,482	1227,192	1220,78	1220,839	1220,862	1219,737
	4. Durum	460,519	429,162	427,738	428,829	426,727	1412,069	1392,864	1397,077	1392,864	1392,264
	5. Durum	284,954	268,823	268,379	268,109	266,725	877,033	872,519	873,998	871,212	870,566
RGK'lı	1. Durum		263,286	264,787	261,73	261,295		868,202	868,326	867,942	867,081
	2. Durum		319,003	318,377	316,156	315,409		1043,384	1043,704	1044,414	1042,456
	3. Durum		372,5	370,347	370,638	369,75		1218,833	1219,246	1218,422	1217,545
	4. Durum		428,284	427,29	427,003	425,977		1391,621	1395,549	1391,636	1391,266
	5. Durum		267,745	265,847	265,634	264,198		868,749	869,577	869,463	868,02

Temel durum analiz sonuçlarına göre, güç sistemlerinde generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri, IEEE 14 baralı sistemde İ-ÖÖTO algoritması RGK'sız, NR'ye, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %64,17, %20,11, %21,60 ve %6,79 oranında, RGK'lı, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %46,45, %60,34 ve %15,95 oranında az olduğu tespit edilmiştir. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, İ-

ÖÖTO algoritması RGK'sız, NR'ye, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %20,37, %1,5, %9,81 ve %12,25 oranında, RGK'lı, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %13,02, %14,26 ve %10,31 oranında azaldığı görülmüştür. Generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri açısından da İ-ÖÖTO algoritmasının, tüm çalışma durumlarında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Tüm durumlar için generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri. a-IEEE 14 baralı, b-İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı (Total active power generation values of generators for all situations. a-IEEE 14 bus, b-Istanbul-Anatolian side 17 bus.)

Tüm çözüm sonuçları incelendiğinde, İ-ÖÖTO algoritmasının, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı açısından diğer algoritmalara göre optimum değerleri verdiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, son yıllarda kullanılan sosyal tabanlı ÖÖTO algoritması ve bu algoritma üzerinde düzenlemeler yaparak İ-ÖÖTO algoritması geliştirilmiştir. Bunlara ek olarak, literatürdeki çalışmalarda kullanılan PSO ve YAA algoritmalarıyla birlikte klasik çözüm yöntemlerinden NR, IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul bölgesinde oluşturulan 17 baralı güç sistemleri üzerinde gerilim kararsızlığını gidermek için optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon algoritmalarıyla yapılan analizler sonucunda, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritmasının, diğer algoritmalara göre gerilim kararlılığı açısından en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür.

Analizleri gerçekleştirmek için seçilen güç sistemleri üzerinde 5 farklı durum tasarlanmıştır. Ayrıca, bu beş durum iki güç sistemi üzerinde de, RGK bağlı olmadan ve bağlandıktan sonraki optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Analizler sonucunda, güç sistemlerdeki güç artışı ve hat kesintilerinin, gerilim kararlılığını olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Bu durumda, generatörlerin, maksimum değerlerde çalışmaya zorlandığı tespit edilmiştir.

Tüm analiz sonuçlarına göre, tüm meta-sezgisel algoritmalar klasik NR yöntemine göre üstünlüğünü göstermiştir. Bu algoritmalar kendi aralarında karşılaştırıldığında, İ-ÖÖTO algoritması, orijinal ÖÖTO, PSO ve YAA'ya göre gerilim kararlılığı

açısından en optimum sonuçları verdiği gözlenmiştir.

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)

Bu çalışmada tüm yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

All authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Steinmetz, C.P. (1920). Power Control and Stability of Electric Generating Stations. American Institute of Electrical Engineers Transmission, 39(2), 1215-1287.
- [2] AIEE Subcommittee on Interconnections and Stability Factors (1937). First Report of Power System Stability. American Institute of Electrical Engineers Transmission, 56(2), 261-282.
- [3] Evans, R. and Bergvall, R. (1924). Experimental Analysis of Stability and Power Limitations. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, XLIII, 39-58.

- [4] Farmer, R. (2001). Power System Dynamics and Stability. The Electric Power Engineering Handbook, Arizona State University, Ed.LL. Grigsby, 30-97.
- [5] Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Cutsem, R. and Vittal, V. (2004). Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transaction on Power Systems, 19(2), 1387-1401.
- [6] Vassel, G.S. (1991). Northcast Blacout of 1965. IEEE Power Engineering Review, 11(1), 4-8.
- [7] Van Cutsem, T. and Vournas, C. (1998). Voltage Stability of Electric Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 213-264.
- [8] Onksakul, W. and Jirapong, P. (2005). Optimal Allocation of FACTS Devices to Enhance Total Transfer Capability Using Evolutionary Programming. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kobe, Japan.
- [9] Ravi, V. and Duraiswamy, K. (2012). Effective Optimization Technique for Power System Stabilization using Artificial Bee Colony. International Conference on Computer Communication and Informatics, Coimbatore, India.
- [10] Deepa, S.N. and Rizwana, J. (2013). Power System Stability by Reducing Power Losses using Optimization Techniques. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Enathi, India.
- [11] Akachukwu, C.M., Aibinu, A.M., Nwohu M.N. and Salau, H.B. (2014). A Decade Survey of Engineering Applications of Genetic Algorithm in Power System Optimization. International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Langkawi, Malaysia.
- [12] Chen, G., Liu, L., Guo, Y. and Huang, S. (2015). Multi-Objective Enhanced PSO Algorithm for Optimizing Power Losses and Voltage Deviation in Power Systems. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 35(1), 350-372.
- [13] Singh, H. and Srivastava, L. (2016). Optimal VAR Control for Real Power Loss Minimization and Voltage Stability Improvement Using Hybrid Multi-Swarm PSO. IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, Nagercoil, India.
- [14] Amrane, Y., Elmaouhab, A., Boudour, M. and Ladjici, A.A. (2017). Voltage Stability Analysis Based on Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch Under Various Contingency. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 9(3), 521-541.
- [15] Li, S., Gong, W., Hu, C., Yan, X., Wang, L. and Gu, Q. (2021). Adaptive Constraint Differential Evolution For Optimal Power Flow. Energy, 235, 121362.
- [16] Ermiş, S. (2018). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Optimizasyonunda Yeni Bir Akıllı Yöntem Geliştirilmesi ve Uygulaması”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [17] Abou El Ela, A.A., Abido, M.A. and Spea, S.R. (2010). Optimal Power Flow Using Differential Evolution Algorithm. Electric Power Systems Research, 80(7), 878-885.
- [18] Abido, M.A. and Bakhshwain, J.M. (2005). Optimal VAR Dispatch Using a Multiobjective Evolutionary Algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 27(1), 13-20.
- [19] Rao, V.R. and Patel, V. (2012). An Elitist Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm For Solving Complex Constrained Optimization Problems. International Journal of Industrial Engineering Computations, 3(4), 535-560.
- [20] Rao, R.V., Savsani, V.J. and Vakharia, D.P. (2011). Teaching-Learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems. Computer Aided Design, 43(3), 303-315.
- [21] Yeşilbudak, M., Ermiş, S. and Bayındır, R. (2017). Farklı Baralara Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(3), 237-246.
- [22] İnternet: IEEE 14 Bus Power Flow Test Case (2008). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Flabs.ece.uw.edu%2Fpstca%2Fpf14%2Fpg_tca14Bara.htm+&date=2018-11-20 adresinden 15.04.2017.

A Study on Organic Chemicals in Children's Room Furniture

Betül HUYUGÜZEL¹  Kemal YILDIRIM^{2*}  Ahmet Fatih KARAKAYA³ 

^{1,2} Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

³ TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, İçmimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Söğütözü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 10/06/2023
Revision: 21/06/2023
Accepted: 21/06/2023

Keywords

Children's spaces
Children's furniture
Organic chemicals
Social awareness
Furniture purchasing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/06/2023
Düzeltilme: 21/06/2023
Kabul: 21/06/2023

Anahtar Kelimeler

Çocuk mekânları
Çocuk mobilyası
Organik kimyasal
Toplumsal bilinç
Mobilya satın alma

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, it was tried to determine the knowledge level of parents who buy children's furniture about organic chemicals. / Bu çalışmada, çocuk mobilyası satın alan ebeveynlerin organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyinin belirlenmesine çalışılmıştır.

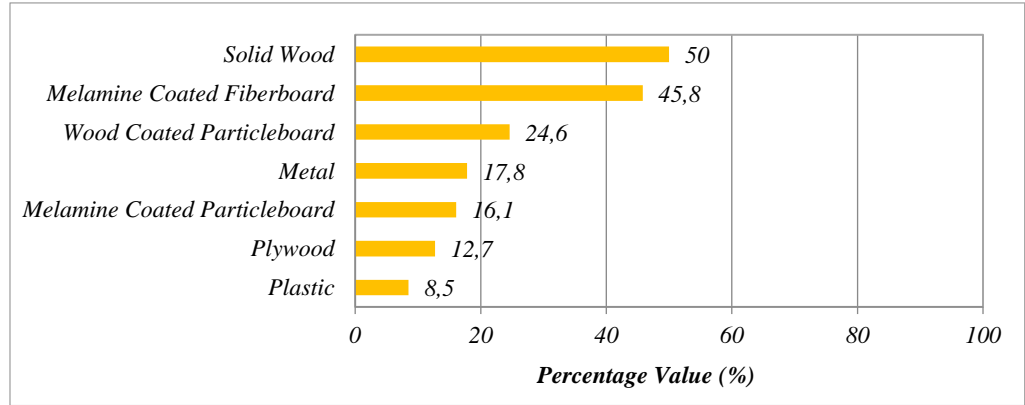


Figure A: Materials used in the furniture examined. / İncelenen mobilyalarda kullanılan malzemeler.

Highlights (Önemli noktalar)

- Chemicals used in furniture production. / Mobilya üretiminde kullanılan kimyasallar.
- Child health and safety. / Çocuk sağlığı ve güvenliği.
- The effect of organic chemicals on furniture preference. / Mobilya tercihinde organik kimyasalların etkisi.

Aim (Amaç): In this study, it is focused on determining the knowledge level of parents living in Ankara about organic chemicals in children's room furniture. / Bu çalışmada, Ankara'da yaşayan ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasallara ilişkin bilgi düzeylerinin belirlenmesine odaklanılmıştır.

Originality (Özgünlük): Determining the knowledge level of parents about organic chemicals in children's room furniture constitutes the original aspect of the research. / Ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasallara ilişkin bilgi düzeylerinin belirlenmesi araştırmanın özgün yanını oluşturmaktadır.

Results (Bulgular): According to the survey data, the furniture and materials used in the children's rooms and the points taken into consideration when purchasing were determined. In addition, it has been found that parents of different gender, age and education levels do not have enough information about the chemicals exposed indoors from the children's room furniture. / Anket verilerine göre, çocuk odalarında bulunan mobilyalar ve kullanılan malzemeler ile satın alınırken dikkate alınan hususlar belirlenmiştir. Ayrıca, farklı cinsiyet, yaş ve eğitim düzeyine sahip ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarından iç mekânda maruz kalınan kimyasallar hakkında yeterli bilgi sahibi olmadıkları bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): It has been suggested to identify the materials and equipment that cause indoor pollution, to classify them and to develop norms, to inform and discuss through the written and visual media, to include them in the higher education curriculum, to provide economic support against harmful organic chemicals, and to research and develop safer alternative materials. / İç mekân kirliliğine neden olan malzeme ve ekipmanların belirlenmesi, bunların sınıflandırılması ve normlar geliştirilmesi, yazılı ve görsel basın yoluyla bilgilendirmeler ve tartışmalar yapılması, yükseköğretim müfredatına dahil edilmesi, zararlı organik kimyasallara karşı ekonomik destek sağlanması ve daha güvenli alternatif malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi önerilmiştir.



Çocuk Odası Mobilyalarında Bulunan Organik Kimyasallar Üzerine Bir Araştırma

Betül HUYUGÜZEL¹ Kemal YILDIRIM^{2*} Ahmet Fatih KARAKAYA³

^{1,2} Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

³ TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, İçmimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Söğütözü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/06/2023
Düzeltilme: 21/06/2023
Kabul: 21/06/2023

Anahtar Kelimeler

Çocuk mekânları
Çocuk mobilyası
Organik kimyasal
Toplumsal bilinç
Mobilya satın alma

Öz

Çocukların güvenliği ve sağlığı, mobilya ve giysilerinde kullanılan malzemeler söz konusu olduğunda en önemli öncelik olmalıdır. Mobilya üretiminde kimyasal kullanımının hem olumlu hem de olumsuz etkileri vardır. Kimyasallar mobilya ürünlerinin kalitesini ve dayanıklılığını artırabilirken, kullanıcılar için sağlık riskleri oluşturabilir. Araştırmalar, zararlı kimyasallara maruz kalmanın çocukların sağlığı üzerinde uzun vadeli olumsuz etkileri olabileceğini göstermiştir, bu da çocuk odaları için mobilya seçimini ebeveynler için önemli bir karar haline getirmektedir. Bu çalışmada, Ankara'da yaşayan ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasallara ilişkin bilgi düzeylerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla hazırlanan araştırma anketini tesadüfi olarak belirlenen 118 katılımcı doldurmuştur. Anketlerden elde edilen verilere göre, çocuk odalarında bulunan mobilyalar ve kullanılan malzemeler ile satın alınırken dikkate alınan hususlar belirlenmiştir. Ayrıca, farklı cinsiyet, yaş ve eğitim düzeyine sahip ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarından iç mekânda maruz kalınan kimyasallar hakkında yeterince bilgi sahibi olmadıkları bulunmuştur.

A Study on Organic Chemicals in Children's Room Furniture

Article Info

Research article
Received: 10/06/2023
Revision: 21/06/2023
Accepted: 21/06/2023

Keywords

Children's spaces
Children's furniture
Organic chemicals
Social awareness
Furniture purchasing

Abstract

The safety and health of children should be a top priority when it comes to the materials used in their furniture and clothing. The use of chemicals in furniture production has both positive and negative effects. While chemicals can improve the quality and durability of furniture products, they can also pose health risks for users. Research has shown that exposure to harmful chemicals can have long-term negative effects on children's health, making the choice of furniture for children's rooms an important decision for parents. In this study, it is focused on determining the knowledge level of parents living in Ankara about organic chemicals in children's room furniture. 118 randomly selected participants filled the research questionnaire prepared for this purpose. According to the data obtained from the questionnaires, the furniture and materials used in the children's rooms and the points taken into consideration when purchasing were determined. In addition, it has been determined that parents of different gender, age and education levels do not have enough knowledge about organic chemicals emitted from children's furniture to the interior.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çocuk odası mobilyası tercihinde renk, malzeme, boyut, güvenlik gibi faktörler etkili olmaktadır. Çocukların fiziksel ve zihinsel gelişimi için mobilyalarda çevre dostu sağlıklı malzemelerin seçimi önemlidir [1,2]. Son zamanlarda, çocuk odası için tercih edilen güvenli ve yüksek kaliteli yeşil ahşap mobilyalar, tüketicilerin temel talebi haline gelmiştir. Bu yeşil mobilyaların satın alınmasında kimyasal faktörlerin göz önünde bulundurulması faydalı olacaktır [3,4]. Tasarımcılar, çocuk odası için mobilya tasarlarlarken çocukların ihtiyaçlarının yanı sıra güvenlik ve sürdürülebilirliği de göz önünde bulundurmalıdır.

Mobilya üretiminde kullanılan kimyasalların yüksek kaliteli mobilya üretimine yardımcı olmak gibi olumlu etkileri olsa da, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkileri de vardır. Ancak, mobilya üretiminde kullanılan ahşap malzemenin, metal ve plastik gibi malzemelere kıyasla daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu bilinmektedir [5,6]. Bu nedenle, mobilya üreticilerinin iç mekân kirliliğine en az zarar verebilecek malzeme ve gereçleri sorumlu bir şekilde kullanmaları ve tüketicilerin sağlık ve güvenliğine öncelik vermeleri önemlidir. İç mekân kirleticileri; temel olarak kanserojenler (kansere üreten maddeler), mutajenler (genetik yapıdaki değişimlere neden olan maddeler), teratojenler (doğum kusurlarına

neden olan maddeler), virüsler, bakteriler ve alerjenlerden oluşmaktadır. İnsan sağlığı için çok ciddi sorunlara yol açabilecek iç mekân kirleticileri; yanıcı (karbondioksit, kükürtdioksit, azotdioksit, karbonmonoksit), uçucu (organoklorlar, fenolik bileşikler, formaldehit vb.) ve zararlı gazlar (azot, radon), parçacıklar (asılı parçacıklar, bakteriler, mantarlar, virüsler) ve radyasyon gibi üç ana formda bulunur [7-9].

Son zamanlarda konut kullanıcılarının büyük bir kısmının fabrikasyon iç mekân donatı elemanlarını tercih ettikleri görülmektedir. Kullanıcıların fabrikasyon ürünleri tercih etmesinde, renk ve desen yelpazesi, malzeme çeşitliliği, hızlı teslim gibi avantajlar etkili olmuştur. Fabrikasyon üretimin sağladığı bu avantajlara karşın, bu ürünlerden ortama yayılan zararlı kimyasallar nedeniyle kullanıcıların sağlığı olumsuz yönde etkilenebilmektedir [10]. Mobilya üretiminde kullanılan bazı vernikler ve ahşap kompozit ürünlerden iç mekân hava kalitesini etkileyebilecek kimyasal maddeler yayma potansiyeline sahip olduğundan kullanıcılar için zararlıdır [11]. Çocuklar her gün zamanlarının neredeyse üçte ikisinde mobilyalarla temas halindedir ve çocukların bağışıklığı yetişkinlere göre daha düşüktür [12]. Daha çok zarar görebileceği düşünülen çocukların yaşam alanlarında bulunan donatı elemanlarından ortama yayılan zararlı gazların etkilerinin bilinmesinde büyük yarar görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada çocukların sağlığını olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülen organik kimyasallar hakkında karar vericiler olarak ebeveynlerin ne kadar bilgiye sahip olduklarının belirlenmesi önem kazanmaktadır.

Bu alanda Kurtoğlu ve Koç [13] çalışmasında, mobilyaların malzeme, çeşitlilik, kalite, fiyat ve sağlamlık konusunda yeterli bilgiye sahip olmadan satın alınmaması gerektiği vurgulanmış, bu konuda bilinçli yaklaşıldığında mobilyaların uzun yıllar kullanılabilmesi bildirilmiştir. Demirarslan ve Aytöre [14] çalışmasında, çocuk odası mobilyası malzemelerinin insan sağlığına etkilerinin bilinmesi gerektiği belirtilmiştir. Burdurlu ve ark. [15] çalışmasında, çocuk odası mobilyası satın alınırken dayanıklı (%67,1), kullanışlı (%74,1) ve emniyetli olması (%76,5) hususlarına daha çok önem verildiği, buna karşın kalite (%48,2), kullanılan malzeme (%47,1) ve ekonomik olması (%47,1) hususlarına ise daha az önem verildiği belirtilmiştir.

Wan, Chen ve Toppinen [16] çalışmasında, insanların sağlık ve çevre bilincinin yükselmesi sonucu, ebeveynlerin bünyesinde toksik maddeler olmayan malzemelerden üretilmiş mobilyaları

tercih ettiği vurgulanmıştır. Ruth [17] çalışmasında, çocuk odası mobilyalarının insan sağlığına zarar vermeyen malzemeler ve güvenlik ilkesi göz önüne alınarak tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır. Yıldırım ve Ünlü [10] çalışmasında, insanların önemli bir kısmının organik kimyasallar hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığı bildirilmiştir. Yine Yıldırım ve ark. [18] çalışmalarında, ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarından iç mekâna yayılan organik kimyasallar hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığı bildirilmiştir.

Ahşap ve ahşap esaslı mobilyalar; iç mekân ortamında çok sayıda uçucu organik kimyasallar (VOC) için potansiyel kaynaklardır [19]. Duy Xuan Ho ve ark. [20] çalışmalarında, çoğunluğu ahşap bazlı olan beş farklı mobilya ürünü örneğini incelemiş ve aromatik hidrokarbonlar grubundan toluen ile terpen grubundan α -pinen maddelerinin yeni üretilmiş mobilyalar tarafından salınımı en yüksek uçucu organik bileşiklerden olduklarını belirlemişlerdir. Wolkoff ve ark. [21] ise terpen grubu gibi oksitlenebilir uçucu organik bileşiklerin reaksiyonlarının tahrişlere ve Hasta Bina Sendromu (HBS) semptomlarının artışına neden olabileceğini vurgulamışlardır. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) İş Sağlığı ve Güvenliği Ansiklopedisi'nde [22] hasta bina sendromu semptomlarının baş ağrısı, bitkinlik, konsantrasyon bozuklukları, uyuklama, deri kaşınması ve tahrişi, diyare gibi merkezi sinir sistemi semptomlarının yanı sıra göz, burun ve boğaz iltihabı ve kaşıntısı, göğüs sıkışması ve astım benzeri semptomlar, koku şikayetleri gibi mukoza zarı tahrişi semptomlarına neden olabildikleri belirtilmiştir.

Thiermeyer [23] çalışmasında, iç mekâna yayılan organik kimyasalların uzun süre temas edilmesi halinde insan sağlığına zarar verdiği bildirilmektedir. İnsanların yaşamlarının büyük çoğunluğunu kapalı mekânlarda geçirdiği düşünüldüğünde, kimyasalların sınır değerleri kolaylıkla aşılabilir ve zararlı maddelere maruz kalınabilir. Sağlıklı bir bireyin günlük ortalama 15 m³ temiz havaya ihtiyacı vardır [24]. May ve Nikiforova'da [25] çalışmalarında, mobilya ve kaplama malzemelerinin çocukların sağlığına olumsuz etki etme riskini azaltmak amacıyla okul öncesi eğitim kurumları, oyun odaları gibi çocukların gün içerisinde sıklıkla zaman geçirdiği kapalı mekânlarda çevreye enaz seviyede kimyasal madde emisyonu yapan mobilyaların kullanımına aşamalı olarak geçilmesi gerektiğini önermişlerdir.

Mobilya üretimi, insan sağlığına zararlı olabilecek çeşitli kimyasalların kullanımını içerir. Bu kimyasallar arasında mobilya üreticileri ve

satıcıları için kimyasal tehlikelere ve alerjik hastalıklara neden olabilen solventler, formaldehit ve fenol bulunmaktadır [26]. Mobilyaların koruyucu ve dekoratif kaplamaları, iç mekân hava ortamına geçebilen solventlerin buhar-gaz karışımlarını da yayabilir [27]. Mobilya üretiminde kullanılan bazı malzemeler, vernikler ve ahşap kompozit ürünlerden iç mekân hava kalitesini etkileyebilecek kimyasal maddeler yayabilir [28]. Bu nedenle, mobilya üretimiyle ilişkili potansiyel risklerin farkında olmak ve zararlı kimyasallara maruziyeti azaltmak için gerekli önlemleri almak önemlidir.

Yukarıda verilen literatürde, iç mekân donatı elemanlarının üretiminde kullanılan liflevha, yongalevha, laminant, kontrplak, PVC gibi malzemelerden açığa çıkan uçucu gazlarla kirlenen havanın, kişilerde HBS semptomlarının yanı sıra nefes alma zorluğu, kanser gibi önemli yapısal hasarlara yol açabileceği bildirilmektedir. Bu nedenle, binaların iç mekânında kullanılan malzemelerin seçimi sağlık açısından büyük önem taşımaktadır [29,30]. Literatür, iç mekân havasını kirleten organik kimyasallar hakkında toplumsal bilincin oluşmadığını göstermektedir. Hâlbuki, organik kimyasalların insan yaşamına zarar veren etkileri kanıtlanmıştır. Bu bilgiler ışığında, organik kimyasallardan daha kolay etkilenen çocukların sağlığı için ucucu gazların zararlı etkileri hakkında ebeveynlerin bilgi sahibi olması ve iç mekân donatı elemanlarının tasarımında ve üretiminde daha çevreci malzemelerin kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, çocuk mobilyası satın alan ebeveynlerin organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyinin belirlenmesine çalışılmıştır. Kurulan araştırma hipotezleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Ebeveynlerin bilgileri (Parents' information)

Ebeveynlerin Bilgileri	f	%	Toplam	
			N	%
Cinsiyet	Kadın	82	118	100
	Erkek	36		
Yaş	25-45	81	118	100
	46-60	37		
Eğitim	Ortaöğretim	20	118	100
	Lisans	61		
	Lisansüstü	37		

f: Katılımcı sayısı, %: Yüzdelerik değer

Tablo 1'e göre, ebeveynlerin %69,5'inin kadın [82 kişi], %30,5'inin erkek [36 kişi], %26,3'ünün 18-35 yaş, %42,4'ünün 36-45 yaş, %31,4'ünün 46 yaş ve üzerinde, %16,9'unun ortaöğretim, %19,5'inin önlisans, %32,2'sinin lisans ve %31,4'ünün ise lisansüstü eğitime sahip olduğu görülmektedir.

H1: Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin cinsiyetine göre farklıdır.

H2: Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin yaşına göre farklıdır.

H3: Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin eğitimine göre farklıdır.

2. YÖNTEM (METOD)

Bu çalışmada, katılımcıların çocuk odası mobilyaları satın alırken dikkate aldığı hususlar ile çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasallar hakkında bilgi düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2.1. Araştırmanın Modeli (Model of the Research)

Bu çalışmada kullanılan hipotezleri sınamak için geliştirilen araştırma anketi, evreni oluşturan Ankara örneklemini üzerinden "genel tarama modeli" kullanılarak seçilen katılımcılara uygulanmıştır. Araştırmada, ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarına yönelik değerlendirmeleri test edilmiş olup, elde edilen sonuçlar sırayla aşağıda verilmiştir.

2.2. Evren ve Örneklem (Universe and Sample)

Araştırma katılan ebeveynlerin cinsiyet, yaş ve eğitim seviyelerine ilişkin demografik bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

2.3. Veri Toplama Araçları (Data Collection Tools)

Araştırma anketinin tasarımında daha önce benzer çalışmalarda [10,18,31-43] geçerli ve güvenilir bulunmuş anketlerden faydalanılmıştır. Anketin ilk bölümünde ebeveynlerin genel bilgilerine yönelik sorular, ikinci bölümünde çocuk odasına yönelik sorular ve üçüncü bölümünde ise ebeveynlerin

organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeylerini ölçmeye yönelik sorular bulunmaktadır. Araştırmada, Google Formlar ara yüzü kullanılarak uygulanacak olan çevrimiçi anketlerin gerekli izni Gazi Üniversitesi Etik Kurulundan 21.03.2023 tarih / E-77082166-302.08.01-619128 sayı numarasıyla alınmıştır. Ebevenler araştırma anketini yaklaşık 20 dakikada doldurmuştur. Ebevenler araştırma ile ilgili bilgilendirilmiş ve ardından sırasıyla anket sorularını değerlendirmeleri istenmiştir.

2.4. Verilerin Çözümlemesi (Analysis of Data)

Bu çalışma, Ankara’da yaşayan 118 ebeven ile yapılmıştır. Buna göre, verilerin Cronbach alfa

güvenilirlik analizi yapılmış, yüzde, aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Değişkenler arasındaki farklılıkların $p < 0,05$ ve $p < 0,10$ düzeylerinde istatistiksel olarak önemli olup olmadığı tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Anket verilerinin değerlendirilmesinde “SPSS Paket Programı” ve “Microsoft Office Excel” programı kullanılmıştır.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Konut Bulguları (Housing Findings)

Araştırılan konutların mülkiyet durumu, oda sayısı ve konutta yaşayan kişi sayısı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Konutlarla ilgili bilgiler (Information about residences)

Konutlarla İlgili Bilgileri	f	%	Toplam		
			N	%	
Konutun Mülkiyet Durumu	Ev sahibi	80	67,8	118	100
	Kiracı	38	32,2		
Konutun Oda Sayısı	2+1	16	13,6	118	100
	3+1	64	54,2		
	4+1	29	24,6		
	5+1 ve üzeri	9	7,6		
Konutta Yaşayan Kişi Sayısı	2 kişi	14	11,9	118	100
	3 kişi	32	27,1		
	4 kişi	56	47,5		
	5 kişi ve üzeri	16	13,6		

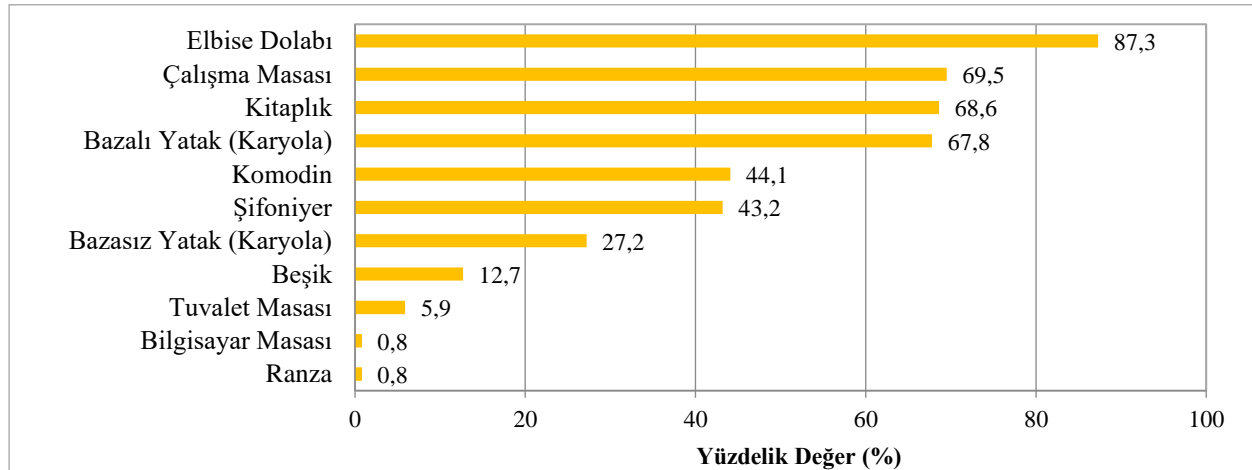
f: Katılımcı sayısı, %: Yüzelik değer

Tablo 2’ye göre, katılımcıların %67,8’i ev sahibi, %32,2’si kiracıdır. Katılımcıların %13,6’sı 2+1, %54,2’si 3+1, %24,6’sı 4+1 ve %7,6’sı 5+1 ve üzerinde oda sayısına sahip konutlarda oturmaktadır. Konutların %11,6’sında 2 kişinin, %27,1’inde 3 kişinin, %47,5’inde 4 kişinin, %13,6’sında ise 5 ve üzerinde kişinin yaşadığı görülmektedir. Ayrıca, ebevenlerin %36,4’ünün 1

çocuğu, %51,7’sinin 2 çocuğu ve %11,9’unun 3 ve üzeri çocuğunun olduğu, bu çocukların %93,2’sinin ise kendisine ait odasının olduğu belirlenmiştir.

3.2. Mobilya Bulguları (Furniture Findings)

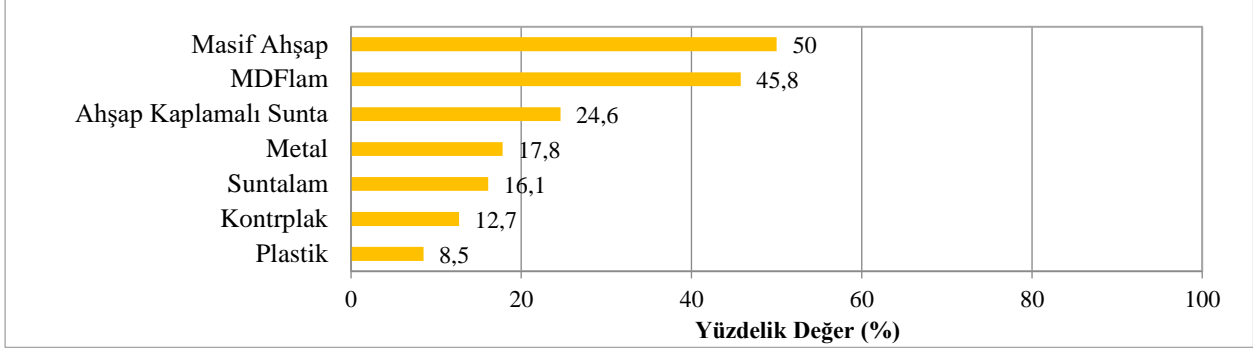
Araştırılan konutların çocuk odalarında bulunan mobilyaların listesi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çocuk odalarında bulunan mobilyalar (Furniture in children's rooms)

Şekil 1’de, araştırılan çocuk odalarının %87,3’ünde elbise dolabı (103 adet), %69,5’inde çalışma masası (82 adet), %68,6’sında kitaplık (81 adet), %67,8’inde bazalı yatak (80 adet), %44,1’inde komodin (52 adet), %43,2’sinde şifonyer (51 adet), %27,2’sinde bazasız yatak (32

adet), %12,7’sinde beşik (15 adet) ve %5,9’unda ise tuvalet masası (7 adet) bulunduğu görülmektedir. Diğer taraftan, araştırılan konutların çocuk odalarında bulunan mobilyalarda kullanılan malzemelerin listesi Şekil 2’de verilmiştir.

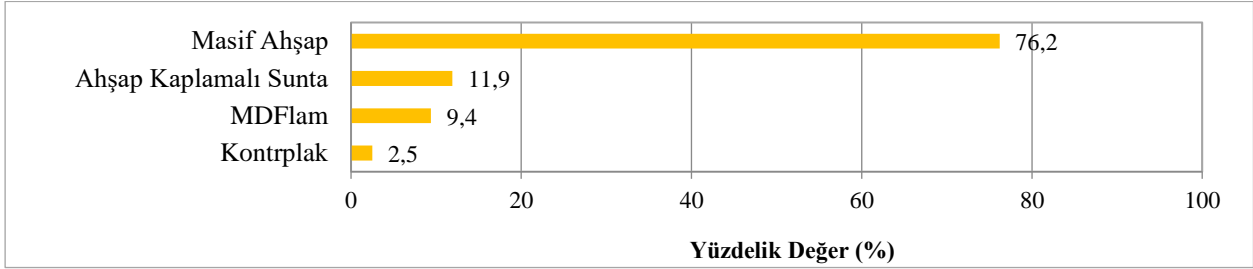


Şekil 2. Mobilyalarda kullanılan malzemeler (Materials used in furniture)

Şekil 2’de, araştırılan çocuk odası mobilyalarının %50’sinde massif ahşap, %45,8’inde MDFlam, %24,6’sında ahşap kaplamalı yongalevha (sunta), %16,1’inde suntalam, %12,7’sinde kontrplak malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca masif ahşap, ahşap kaplamalı yonga levha ve kontrplak mobilyaların %50’sinin yüzeyinin lake

boya, %33’ünün yüzeyinin su bazlı vernik, %10’unun yüzeyinin poliüretan vernik ve %7’sinin yüzeyinin ise selülozik vernikle kaplı olduğu belirlenmiştir.

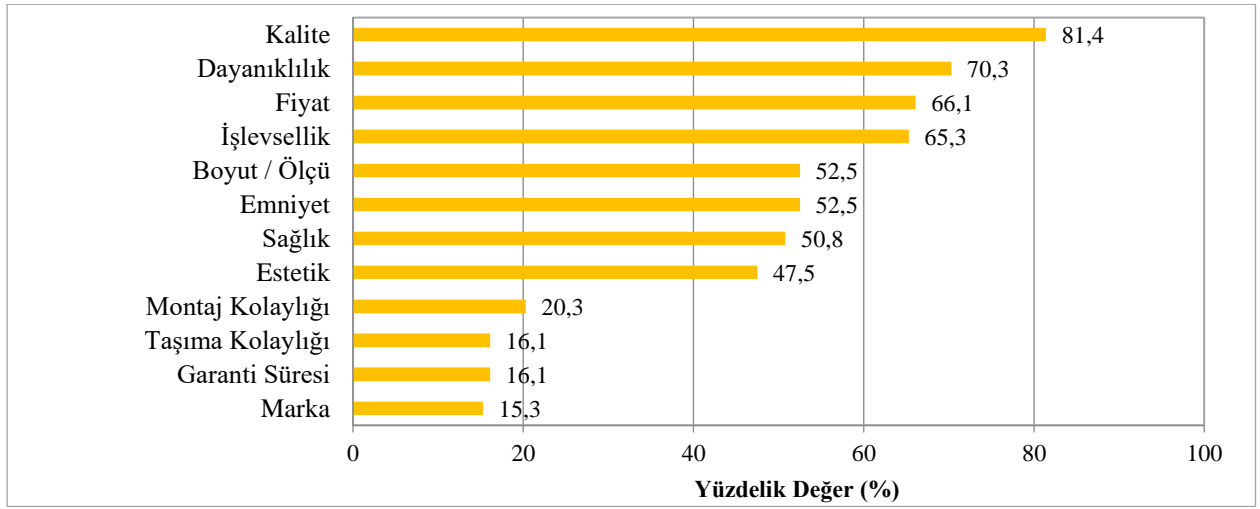
Araştırmaya katılan ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında kullanılmasını istediği malzemelerin listesi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Mobilyalarda kullanılması istenen malzemeler (Materials to be used in furniture)

Şekil 3’de, ebeveynlerin %76,2’sinin çocuk odası mobilyalarında masif ahşap, %11,9’unun ahşap kaplamalı yongalevha (sunta), %9,4’ünün MDFlam ve %2,5’inin ise kontrplak malzemenen

yapılmasını istediği görülmektedir. Araştırmaya katılan ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarını satın alırken dikkate aldığı hususlar Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Çocuk odası mobilyası satın alınırken dikkate alınan hususlar (Considerations when purchasing nursery furniture)

Şekil 4’de, ebeveynlerin %81,4’ünün çocuk odası mobilyası satın alırken kalite, %70,3’ünün dayanıklılık, %66,1’inin fiyat, %65,3’ünün işlevsellik, %52,5’inin boyut ve emniyet, %50,8’inin sağlık, %47,5’inin estetik, %20,3’ünün montaj kolaylığı, %16,1’inin taşıma kolaylığı ve garanti süresi ve %15,3’ünün ise marka hususlarına önem verdiği görülmektedir.

3.3. Organik Kimyasallarla İlgili Bulgular

Ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerinin belirlenmesi için kullanılan bağımlı değişkenlerin güvenilirliği Cronbach alfa ile test edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Güvenilirlik analizi tablosu (Reliability analysis table)

Bağımlı Değişkenler	Unsur Güvenilirliği	Ölçek Güvenilirliği
A:İç mekânda kullanılan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen kimyasal maddeleri biliyorum.	0,915	
B:İç mekânda kullanılan bazı halı ve kumaş türevlerinin alerjik rahatsızlıklara neden olabileceğini biliyorum.	0,918	
C: Mobilyalarda kullanılan boya ve verniklerden açığa çıkan zararlı gazları biliyorum.	0,908	
D: Formaldehit’in tutkal ve koruyucu madde olarak liflevha, yongalevha, kontrplak ve lamine masif levha gibi preslenmiş ahşap esaslı plakalarda kullanıldığını biliyorum.	0,907	
E:Formaldehit’in kanserojen etkiye sahip olduğunu biliyorum.	0,910	0,920
F:Bazı plastik türlerinin zararlı duman ve gaz açığa çıkardığını biliyorum.	0,906	
G:Toprak, doğal taş, tuğla içerikli yapı malzemelerinde bulunan radon gazının akciğer kanserine neden olduğunu biliyorum.	0,920	
H:Çocuk odası mobilyalarında kullanılan vernik ve boyaların zararlı kimyasal madde içerebileceğini biliyorum.	0,905	
K:İnsan sağlığını tehdit eden kanserojenleri, teratojenleri, mutajenleri, bakterileri, virüsleri ve alerjenlerden oluşan iç mekân kirleticilerini; yanıcı, uçucu ve zararlı gazlar ile parçacıkları ve radyasyonu biliyorum.	0,906	

Not: Tabloda verilen unsurların ve ölçeğin güvenilirliği sağlanmıştır.

Tablo 3’e göre, ebeveynlerin organik kimyasallar hakkındaki soruları bilme düzeylerini belirlemek için kullanılan dokuz unsurun oluşturduğu ölçeğin güvenilirlik katsayısı 0,92’dir. Daha önce Cronbach [44] ve Panayides’in [45] çalışmalarında çeşitli unsurlar için alfa güvenilirlik katsayılarını 0.70’in üzerinde çıktığında “güvenilir” olarak kabul edilebileceği ifade edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen Cronbach alfa katsayısının belirtilen

değerin üzerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, kullanılan ölçek güvenilir bulunmuştur.

Araştırmaya katılan ebeveynlerin cinsiyetlerine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerini içeren verilerin ortalama ve standart sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Ebeveynlerin cinsiyetine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture by gender of parents)

Bağımlı Değişkenler	Cinsiyet						ANOVA Sonuçları		
	Kadın		Erkek		Toplam		F	df	Sig.
	M ^a	SD	M	SD	M	SD			
A	3,05	0,93	2,56	1,03	2,90	0,98	6,617	1	0,011*
B	2,44	1,04	2,33	1,01	2,41	1,03	0,261	1	0,610 ^{ns}
C	3,15	1,04	2,56	1,16	2,97	1,11	7,495	1	0,007*
D	3,16	1,11	2,67	1,33	3,01	1,19	4,362	1	0,039*
E	3,21	1,37	2,56	1,40	3,01	1,41	5,594	1	0,020*
F	2,80	1,25	2,36	1,20	2,67	1,25	3,225	1	0,075**
G	3,65	1,24	2,97	1,44	3,44	1,34	6,670	1	0,011*
H	2,76	1,11	2,22	1,12	2,59	1,13	5,770	1	0,018*
K	3,04	1,13	2,47	1,08	2,86	1,14	6,425	1	0,013*

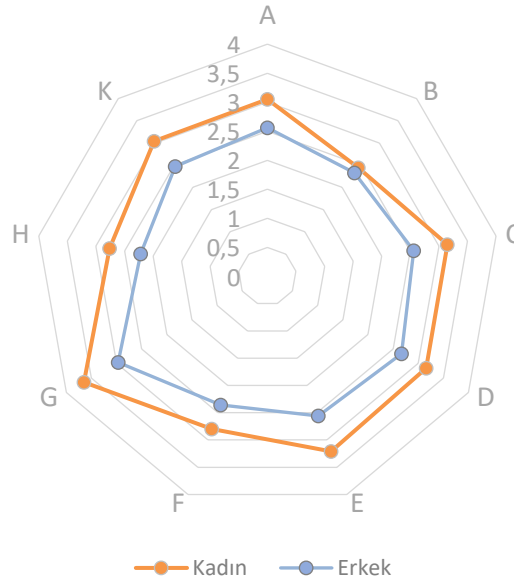
Not: * $p < 0,05$ ve ** $p < 0,10$ düzeylerinde önemlidir. ^{ns}: $p < 0,05$ düzeyinde önemsizdir.

M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

a: Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Tablo 4'te verilen sonuçlarda, kadın ve erkek ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında A, C, D, E, G, H

ve K unsurları için $p < 0,05$ ve $p < 0,10$ düzeylerinde istatistiksel olarak önemli farklılıklar bulunmuştur. Bu sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5'te verilmektedir.



Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Şekil 5. Ebeveynlerin cinsiyetine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture by gender of parents)

Şekil 5'de verilen kadın ve erkek ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerine göre, "Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin cinsiyetine göre farklıdır." hipotezi (H1) desteklenmiştir. Buna göre, farklı cinsiyete sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri arasında

önemli farklılıkların olduğu söylenebilir.

Araştırmaya katılan ebeveynlerin yaşlarına göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerini içeren verilerin ortalama ve standart sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Ebeveynlerin yaşına göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture according to parents' age)

Bağımlı Değişkenler	Yaş						ANOVA Sonuçları		
	25-45		46-60		Toplam		F	df	Sig.
	M ^a	SD	M	SD	M	SD			
A	2,86	1,01	3,24	0,76	3,02	0,93	3,748	1	0,055*
B	2,30	1,07	2,51	0,90	2,39	1,00	0,961	1	0,330 ^{ns}
C	2,78	1,07	3,27	0,96	2,99	1,05	4,834	1	0,031*
D	2,90	1,23	3,27	1,01	3,06	1,15	2,217	1	0,140 ^{ns}
E	2,82	1,45	3,02	1,16	2,91	1,33	0,508	1	0,478 ^{ns}
F	2,60	1,12	2,81	1,17	2,69	1,14	0,719	1	0,399 ^{ns}
G	3,26	1,30	3,70	1,19	3,45	1,27	2,617	1	0,105**
H	2,52	1,18	2,81	0,99	2,64	1,11	1,468	1	0,229 ^{ns}
K	2,74	1,15	3,08	1,03	2,89	1,11	2,015	1	0,159 ^{ns}

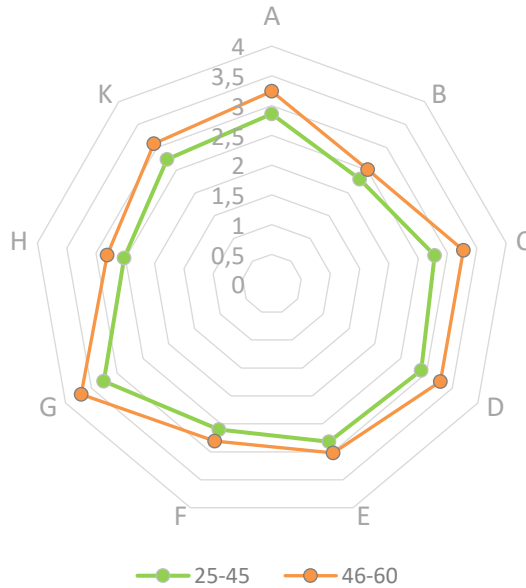
Not: * $p < 0,05$ ve ** $p < 0,10$ düzeylerinde önemlidir. ^{ns}: $p < 0,05$ düzeyinde önemsizdir.

M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

a: Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Tablo 5'de verilen sonuçlarda, 25-45 ve 46-60 yaş ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında A, C ve G unsurları için $p < 0,05$ ve $p < 0,10$ düzeylerinde istatistiksel olarak

önemli farklılıklar bulunmuştur. Fakat diğer unsurlar için önemli bir farklılık bulunamamıştır. Bu sonuçlar grafiksel olarak Şekil 6'da verilmektedir.



Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Şekil 6. Ebeveynlerin yaşına göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture by age of parents)

Şekil 6'da 25-45 ve 46-60 yaş ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerine ilişkin verilen sonuçlar; "Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin yaşına göre farklıdır." hipotezini (H2) genel itibarıyla desteklemiştir. Buna göre, farklı yaşa sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri arasında önemli farklılıkların

olduğu söylenebilir. Bu sonuç, daha genç grubu temsil eden 25-45 yaş aralığındaki ebeveynlerin, 46-60 yaş aralığındaki ebeveynlere göre organik kimyasalları bilme düzeylerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Araştırmaya katılan ebeveynlerin eğitimlerine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerini içeren verilerin ortalama ve standart

sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ebeveynlerin eğitimine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture according to parents' education)

Bağımlı Değişkenler	Eğitim								ANOVA Sonuçları		
	Ortaöğretim		Lisans		Lisansüstü		Toplam		F	df	Sig.
	M ^a	SD	M	SD	M	SD	M	SD			
A	3,15	0,98	2,95	0,76	2,64	1,22	2,86	1,06	1,590	2	0,211 ^{ns}
B	2,75	0,96	2,39	0,94	2,08	1,16	2,34	1,08	2,643	2	0,078**
C	3,10	1,16	2,82	0,93	2,72	1,30	2,85	1,17	0,651	2	0,525 ^{ns}
D	3,10	1,07	2,95	0,76	2,72	1,50	2,89	1,22	0,641	2	0,529 ^{ns}
E	3,85	1,30	3,13	0,96	2,27	1,40	2,91	1,42	10,497	2	0,000*
F	2,80	1,23	3,04	1,06	2,37	1,31	2,68	1,25	2,204	2	0,117 ^{ns}
G	3,40	1,18	3,34	1,26	3,27	1,44	3,33	1,32	0,066	2	0,936 ^{ns}
H	2,95	1,14	2,52	0,84	2,24	1,18	2,50	1,11	2,735	2	0,071**
K	3,35	1,08	2,73	1,05	2,56	1,19	2,81	1,16	3,188	2	0,047*

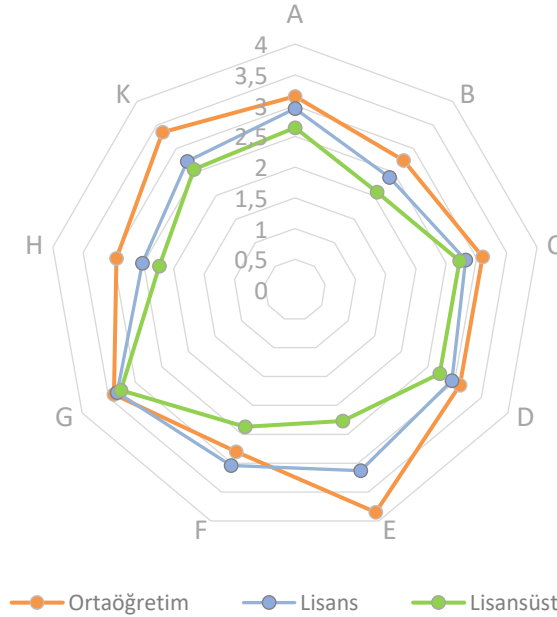
Not: * $p < 0,05$ ve ** $p < 0,10$ düzeylerinde önemlidir. ^{ns}: $p < 0,05$ düzeyinde önemsizdir.

M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

a: Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Tablo 6'da verilen sonuçlarda, ortaöğretim, lisans ve yüksek lisans mezunu ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında

B, E, H ve K unsurları için $p < 0,05$ ve $p < 0,10$ düzeylerinde istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar grafiksel olarak Şekil 7'de verilmektedir.



Değişken ortalamaları 1'den 5'e kadar sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Şekil 7. Ebeveynlerin eğitimine göre çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalları bilme düzeyleri (Level of awareness of organic chemicals in children's room furniture by education of parents)

Şekil 7'de ortaöğretim, lisans ve yüksek lisans mezunu ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeylerine ilişkin verilen sonuçlar; "Çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyi ebeveynlerin eğitimine göre farklıdır." hipotezini (H3) genel itibarıyla desteklemiştir. Buna göre, farklı eğitime sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri

arasında önemli farklılıkların olduğu söylenebilir. Bu sonuç, daha fazla eğitim alan ebeveynlerin, daha düşük eğitim alan ebeveynlere göre organik kimyasalları bilme düzeylerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu araştırmada, farklı ebeveyn gruplarının çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasındaki farklılıklar belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

İlk sonuçta, kadın ve erkek ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında önemli farklılıklar bulunmuştur. Buna göre, erkeklerin “*insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen kimyasal maddeleri*”, “*mobilyalarda kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zararlı gazları*”, “*formaldehit'in tutkal ve koruyucu madde olarak liflevha, yongalevha, kontrplak ve lamine masif levha gibi preslenmiş ahşap esaslı plakalarda kullanıldığını*”, “*formaldehit'in kanserojen etkiye sahip olduğunu*”, “*bazı plastik türlerinin zararlı duman ve gaz açığa çıkardığını*” ve “*toprak, tuğla, doğal taş içerikli yapı malzemeleri ve elemanlarında bulunan radon gazının akciğer kanserine neden olduğunu*” kadınlara oranla biraz daha fazla bilgiye sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve Ünlü [10] ve Yıldırım ve ark. [18] tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarını desteklememiştir.

Diğer bir sonuçta, 25-45 ve 46-60 yaş ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında önemli farklılıklar bulunmuştur. Buna göre, 25-45 yaşındaki ebeveynlerin “*mobilyalarda kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zararlı gazları*” ve “*toprak, tuğla, doğal taş içerikli yapı malzemeleri ve elemanlarında bulunan radon gazının akciğer kanserine neden olduğunu*” 46-60 yaşındaki ebeveynlere oranla daha fazla bilgiye sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve Ünlü [10] ve Yıldırım ve ark. [18] tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarını desteklemiştir.

Başka bir sonuçta, ortaöğretim, lisans ve yüksek lisans mezunu ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarında bulunan organik kimyasalların insan sağlığına etkilerini bilme düzeyleri arasında önemli farklılıklar bulunmuştur. Buna göre, yüksek lisans mezunu ebeveynlerin “*iç mekânda kullanılan bazı halı ve kumaş türlerinin alerjik rahatsızlıklara neden olduğunu*”, “*formaldehit'in kanserojen etkiye sahip olduğunu*”, “*mobilyalarda kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zararlı gazları*”, “*İnsan sağlığını tehdit eden kanserojenleri, teratojenleri, mutajenleri, bakterileri, virüsleri ve alerjenlerden oluşan iç mekân kirleticilerini; yanıcı, uçucu ve zararlı*

gazlar ile parçacıkları ve radyasyonu biliyorum.” ortaöğretim mezunu ebeveynlere oranla daha fazla bilgiye sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve Ünlü [10] ve Yıldırım ve ark. [18] tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarını desteklemiştir.

Yukarıdaki sonuçlar, ebeveynlerin çocuk odası mobilyalarından iç mekâna yayılan organik kimyasalların insan sağlığına yaptığı zararlı etkileri hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığını göstermektedir. Özellikle kadınlar, 46-60 yaş grubu ve ortaöğretim mezunu katılımcıların organik kimyasalların zararlı etkileri hakkında biraz daha az bilgiye sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan hareketle, daha önce Yıldırım ve ark. [18] tarafından dile getirildiği gibi “*insanların ruhen ve bedenen sağlıklı kalabilmeleri*”, “*iç mekân hava kalitesinin en az dış ortam hava kalitesi kadar temiz olması*”, “*doğal çevreye daha az zarar verilmesi*”, “*sürdürülebilir bir dünya*”, “*sağlıklı ve başarılı nesillerin yetiştirilmesi*”, “*aile bütünlüğünün uzun süre korunabilmesi*” ve “*mutlu ve huzurlu bir toplum*” için iç mekân kirleticilerinin daha fazla tanıtılması büyük önem taşımaktadır.

İnsan sağlığını korumak için organik kimyasalların zararlı etkileri konusunda kamu bilincinin artırılması çeşitli engeller ve zorluklarla karşılaşabilir. Başlıca zorluklardan biri, organik kimyasallara maruz kalmayla ilişkili potansiyel sağlık riskleri hakkında halk arasında bilgi ve enformasyon eksikliğidir. Araştırmalar, birçok insanın organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki tehlikeli etkilerinin farkında olmadığını göstermiştir [10,18]. Bir diğer engel de, zararlı ürünlere kıyasla daha pahalı ve daha az erişilebilir oldukları algısı nedeniyle organik ürünlere yönelik talep eksikliğidir. Organik kimyasalların arkasındaki bilimin karmaşıklığı ve insan sağlığı üzerindeki etkileri, bilginin genel halka açık ve anlaşılır bir şekilde iletilmesini zorlaştırabilir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için iç mekân kirliliğine neden olan malzeme ve ekipmanların belirlenmesi, bunların sınıflandırılması ve normlar geliştirilmesi, yazılı ve görsel basın yoluyla bilgilendirmeler ve tartışmalar yapılması, yükseköğretim müfredatına dahil edilmesi, zararlı organik kimyasallara karşı ekonomik destek sağlanması ve daha güvenli alternatif malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi önerilebilir. Bu öneriler ve geliştirilecek normlar; tüm toplum kesimlerinin kirleticilere yönelik bilinç düzeyini artırabilir ve daha sağlıklı mobilya tercihlerinde bulunmalarını sağlayabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırmanın anketini dolduran değerli katılımcılara ve Gazi Üniversitesi Etik Kuruluna çok teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu çalışmada kullanılan anket verileri, materyal ve yöntemler için Gazi Üniversitesi Etik Kurulundan 21.03.2023 tarih / E-77082166-302.08.01-619128 sayı numarasıyla izin alınmıştır.

For the survey data, materials and methods used in this study, permission was obtained from Gazi University Ethics Committee with the date 21.03.2023 / number E-77082166-302.08.01-619128.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Betül Huyugüzel: Araştırma verilerinin toplanmasına ve makalenin yazım işlemine katkıda bulunmuştur.

She contributed to the collection of research data and the writing of the article.

Kemal Yıldırım: Araştırma verilerinin toplanmasını, verilerin analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemine gerçekleştirmiştir.

He carried out the collection of research data, the analysis of the data and the writing of the article.

Ahmet Fatih Karakaya: Literatür çalışmasına ve makalenin yazım işlemine katkıda bulunmuştur.

He contributed to the literature study and the writing process of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dai, L., Xu, B. Research on the furniture design criteria for children's psychological development in home environment. In International Conference on Human-Computer Interaction, Orlando, FL, USA. 2019; 277-286.
- [2] Jiang, L., Cheung, V., Westland, S., Rhodes, P. A., Shen, L., and Xu, L. The impact of color preference on adolescent children's choice of furniture. *Color Research & Application*. 2020; 45, 754-767.

- [3] Andaç, T., Güzel, A. Attitudes of families with children towards eco-friendly designed furniture: Kayseri sample. *BioResources*. 2017; 12, 5942-5952.
- [4] Huang, J. Preparation of Zinc Oxide Nanomaterial and Research and Development of Antibacterial Property. *Annales De Chimie: Science Des Materiaux*. 2021; 45, 407-415.
- [5] González-García, S., Lozano, R. G., Moreira, M. T., Gabarrell, X., i Pons, J. R., Feijoo, G., & Murphy, R. J. Eco-innovation of a wooden childhood furniture set: an example of environmental solutions in the wood sector. *Science of the Total Environment*. 2012; 426, 318-326.
- [6] Wang, S., SU, D. and Zhu, S. A comparative study on life cycle assessment of typical wood base furniture. In: Proceedings of the 2016 5th International Conference on Sustainable Energy and Environment Engineering [ICSEEE 2016], 2016, Zhuhai, China. The Netherlands: Atlantis Press. <http://dx.doi.org/10.2991/icseee-16.2016.115>.
- [7] Pearson, D. *The Natural House Book*, First Published: Conran Octopus Limited, London. 1989.
- [8] Vural, S.M., Balanlı, A. Yapı Ürünü Kaynaklı İç Hava Kirliliği Risk Değerlendirmede Ön Araştırma, *YTÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2005; 1, 28-39.
- [9] Yurtseven, E. İki Farklı Coğrafi Bölgedeki İlköğretim Okullarında İç Ortam Havasının İnsan Sağlığına Etkileri Yönünden Değerlendirilmesi, T.C. İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 2007.
- [10] Yıldırım, K., Ünlü, F. Determination of Users' Knowledge on the Impact of Organic Chemicals in Interior Equipment Elements on Health: Ankara/Turkey Sample. *Open Environmental Sciences*. 2013; 7, 32-40.
- [11] Jeon, J., Lee, J. H. and Kim, S. Soybean-based green adhesive for environment-friendly furniture material. *Materials*. 2011; 22, 174-182.
- [12] Yuan, Z. and Yi, Shi. Analysis of Paper Children's Furniture Design Based on 4R Principle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1865 032070 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1865/3/032070
- [13] Kurtoglu, A., Koç, H. Mobilya Endüstrisinde Standardizasyon ve Kalite. *Mobilya-Dekorasyon Dergisi*. 1996; 12, 8-19.
- [14] Demirarslan, D., Aytöre, S. Çocuğun Fiziksel ve Ruhsal Gelişimi Açısından Çocuk Odaları

- Tasarımında Malzeme Kullanımı ve Malzeme Seçiminin Önemi. 2. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, September 6-8, Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi. 2014.
- [15] Burdurlu, E., Kılıç, Y., İlçe, A.C., Elibol, G.C., Yener, G. Okul Öncesi Çocuk Mobilyaları İle İlgili Ebeveyn Görüşleri ve Öngörülen Mobilya Tasarım Ölçütleri, Teknoloji. 2004; 7, 139-149.
- [16] Wan, C.M., Jiao Chen, J., Toppinen, A. Consumers' Environmental Perceptions of Children's Furniture in China. Forest Products Journal. 2015; 65, 395-405.
- [17] Ruth, L.C. Design Standards for Children's Environments. McGraw-Hill, 860 Taylor Station Rd., Blacklick, OH 43004-0545. 2000.
- [18] Yıldırım, K., Yılmaz, H., Huyugüzel, B. Çocuk Odası Donatı Elemanlarındaki Organik Kimyasalların Ebeveynlerin Tercihleri Üzerindeki Etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2020; 8, 798-809.
- [19] Salthammer, T., Schwarz, A., Fuhrmann, F. Emission of reactive compounds and secondary products from wood-based furniture coatings. Atmospheric Environment. 1998; 33, 75-84.
- [20] Duy Xuan Ho, Ki-Hyun Kim, Jong Ryeul Sohn, Youn Hee Oh, Ji-Won Ahn Emission Rates of Volatile Organic Compounds Released from Newly Produced Household Furniture Products Using a Large-Scale Chamber Testing Method. The Scientific World Journal. 2011; 11, 1597-1622.
- [21] Wolkoff, P., Clausen, P.A., Jensen, B., Nielsen, G.D., Wilkins, C.K. Are we measuring the relevant indoor pollutants? Indoor Air. 1997; 7, 92-106.
- [22] Uluslararası Çalışma Örgütü [ILO]. ILO İş Sağlığı ve Güvenliği Ansiklopedisi. 2011.
- [23] Thiermeyer M. Klimazone. AİT 10.198. 1994.
- [24] Tecer L.H. Hava Kirliliği ve Sağlığımız. Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim. 2011; 135: 15-29.
- [25] May, I.V., Nikiforova, N.V. Assessment of Inhalation Risk to Children's Health Under the Exposure of Chemicals Migrating From Furniture Products. Advances in Health Sciences Research. 2020; 28, 244-249.
- [26] Ikhogo, D. E. and Ikhogo, E.O. Chemical Hazards and Allergic Diseases of Furniture Makers and Attitude towards the Use of Protective Equipments in Ethiopia East L.G.A of Delta State. International Journal of Health Sciences and Research. 2022; 1, 218-222.
- [27] Rybin, B., Safin, R., Zavrzhnova, I., Mukhametzyanov, S. and Rybin, D., ve Gazizulina, A. Chemical Safety of Furniture Products. Coatings. 2019; 11, 708-719.
- [28] Hamdi, Z. ve Ahmad, A. G. Sick Building Syndrome: The Effects of Animal and Plant-Based Adhesive in Wood Furniture. ARTEKS: Jurnal Teknik Arsitektur. 2023; 8, 9-20.
- [29] Pearson D. The Natural House Book. London: Conran Octopus Limited. 1989.
- [30] Yıldırım K. Bitkilerin İç Mekân Kirleticileri Üzerindeki Etkileri: İçmimar Dergisi. 2013: 107-115.
- [31] Yıldırım, K. Günümüz konut mutfağında donatı elemanları üzerine bir araştırma. Politeknik Dergisi. 1999; 2, 7 - 14.
- [32] Yıldırım, K. ve Hacıbaloğlu, M..Konut Mutfakları ile İlgili Ergonomik Bir Araştırma, G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi. 2000; 13, 549-566.
- [33] Başkaya, A, Yıldırım, K, Muslu, M. Poliklinik bekleme alanlarında fonksiyonel ve algı-davranışsal kalite: Ankara, İbni Sina Hastanesi Polikliniği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2005; 20, 53 - 68.
- [34] Yıldırım, K. ve Hidayetoğlu, M. L. Effects of the locations of curved areas in the main living rooms of apartment housing on user perceptions. G.U. Journal of Science. 2008; 21, 51-63.
- [35] Yıldırım, K., Akalın, A. Problems related to the dimensions of curved areas in the main living rooms of apartment housing, Journal of Architectural and Planning Research. 2009; 26, 70-87.
- [36] Akalın, A., Yıldırım, K., Wilson, C. and Saylan, A. Users' evaluations of house façades: Preference, complexity and impressiveness. Open House International. 2010; 35, 57-65.
- [37] Erdogan, E., Akalin, A., Yildirim, K., Erdogan H.A. Students' evaluations of different architectural styles. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2010; 5, 875-881.
- [38] Yıldırım, K. ve Uzun, O. The effects of space quality of dormitory rooms on functional and perceptual performance of users: Zübeyde Hanım Sorority, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2010; 23, 519-530.
- [39] Ünlü, F., Yıldırım, K. Exploring the Knowledge Level of Interior Architecture and Environmental Design Students on Indoor Air Pollutants. MEGARON. 2015; 10, 622-636.

- [40] Çağatay, K., Hidayetoğlu, M. L. ve Yıldırım, K. Lise koridor duvarlarında kullanılan renklerin öğrencilerin algısal değerlendirmeleri üzerindeki etkileri. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi. 2017; 32, 466-479.
- [41] Yıldırım, K., Başkaya, A. ve Hidayetoğlu, M.L. Farklı Sosyo Ekonomik Düzeye Sahip Blok-Konut Kullanıcılarının Sabit İç Donatım Elemanlarından Memnuniyeti, Politeknik Dergisi. 2005; 8, 189-197.
- [42] Yıldırım, K., Hidayetoğlu, M. L. ve Şen, A. Farklı Mimari biçimlerdeki kafe/pastane mekânlarının kullanıcıların algı-davranışsal performansı üzerine etkisi. Politeknik Dergisi. 2007; 10, 295-301.
- [43] Yıldırım, K., Akalın, A. Çağatay, K. Otel Yatak Odalarının İç Mekân Tasarımının Kullanıcıların Algı-Davranışsal Performansı Üzerine Etkisi. Politeknik Dergisi. 2008; 11, 175-185.
- [44] Cronbach, L. J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika. 1951; 16, 297-334.
- [45] Panayides, P. Coefficient alpha: Interpret with caution. Europe's Journal of Psychology. 2013; 9, 687-696.

Recognition of Online Turkish Handwriting using Transfer Learning

Esmâ Fatıma BİLGİN TAŞDEMİR^{1*} 

¹Istanbul Medeniyet University, Faculty of Arts and Humanities, Department of Information and Document Management, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/07/2022
Revision: 21/12/2022
Accepted: 21/12/2022

Keywords

Online Handwriting
Recognition
Deep Learning
Transfer Learning,
Turkish Handwriting
Recognition CNN-BLSTM

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2022
Düzeltilme: 21/12/2022
Kabul: 21/12/2022

Anahtar Kelimeler

Çevrimiçi El Yazısı Tanıma
Derin Öğrenme
Transfer Öğrenme
Türkçe El Yazısı Tanıma
CNN-BLSTM

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Using Transfer learning for training a Deep Neural Network helps overcoming data scarcity problem in recognition of Turkish online handwritings. This work propose a CNN-BLSTM network which is pretrained with a large English dataset and fine-tuned with a small Turkish dataset. / Türkçe çevrimiçi el yazılarının tanınmasında kullanılacak derin bir Yapay Sinir Ağına eğitmek için Transfer öğrenimini kullanmak, veri kıtlığı sorununa bir çözüm sunabilir. Bu çalışma, önce büyük bir İngilizce veri seti ile eğitilmiş bir CNN-BLSTM ağına küçük bir Türkçe veri seti ile ince ayar yapılmasını önermektedir.

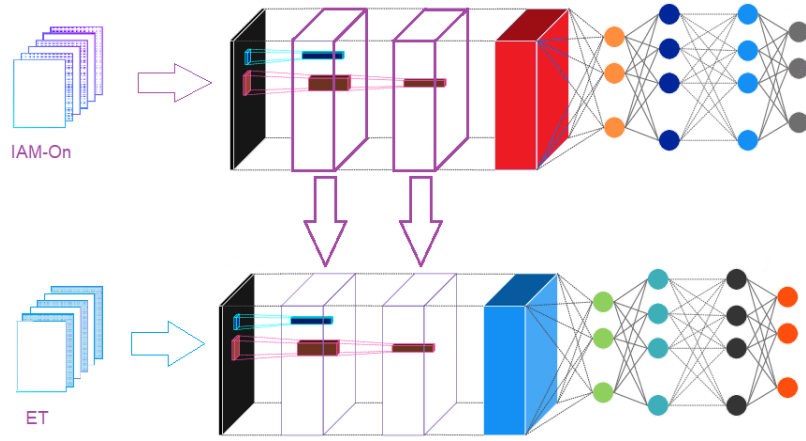


Figure A: Transfer Learning on a CNN-BLSTM Network /Şekil A: Bir CNN-BLSTM Ağında Transfer Öğrenme

Highlights (Önemli noktalar)

- The Transfer Learning with fine tuning technique provides a solution to the data scarcity problem of Turkish handwriting recognition. / İnce ayarlı Transfer Öğrenme tekniği Türkçe el yazısı tanıma problemi için veri azlığı sorununa bir çözüm sunmaktadır.
- IAM-On dataset English handwriting dataset can be used for pretraining of a CNN-BLSTM network. / İngilizce el yazısı veri seti IAM-On, bir CNN-BLSTM ağının ön eğitimi için kullanılmıştır.
- Fine tuning the system with Turkish samples from ET dataset increases recognition accuracy on 2,041 Turkish samples from 49% to 85% / Ön eğitilmiş sistemi Türkçe ET veri seti ile ince ayar yaparak karakter tanıma başarısı %49'dan %85'e çıkarılmıştır.

Aim (Amaç): To develop an online handwriting recognition system for Turkish / Türkçe çevrimiçi el yazısı tanıma sistemi geliştirmek.

Originality (Özgünlük): The first work in the literature to use Transfer Learning for online Turkish handwriting recognition / Literatürdeki ilk Transfer Öğrenme kullanılan Türkçe çevrimiçi el yazısı tanıma sistemi .

Results (Bulgular): The proposed system achieves 85% character recognition accuracy on ET dataset / Geliştirilen sistem ET veri seti üzerinde %85 karakter tanıma başarısı göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): The data scarcity of Turkish handwriting recognition problem can be overcome by using The Transfer Learning with fine tuning technique / Türkçe el yazısı tanıma problemi için veri azlığı sorunu İnce ayarlı Transfer Öğrenme tekniği ile çözülebilmektedir.



Recognition of Online Turkish Handwriting using Transfer Learning

Esmâ Fatıma BİLGİN TAŞDEMİR¹

¹Istanbul Medeniyet University, Faculty of Arts and Humanities, Department of Information and Document Management, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/07/2022
Revision: 21/12/2022
Accepted: 21/12/2022
Keywords

Online Handwriting
Recognition
Deep Learning
Transfer Learning,
Turkish Handwriting
Recognition CNN-
BLSTM

Abstract

We present a recognition system for online Turkish handwriting using transfer learning. Training deep networks requires large amounts of data. Since such a sufficiently large collection of Turkish handwriting samples is not available, so we adopt the transfer learning approach and train and optimize a CNN-BLSTM recognition system first using the standard IAM-On dataset of English handwriting. Then, we fine tune it with Turkish handwriting samples from a smaller dataset. Fine tuning increases the character recognition rate of the final system which is evaluated on 2,041 samples of isolated Turkish words from the initial value of 49% to 85%. The results show that transfer learning can be a solution to the data scarcity problem of online Turkish handwriting.

Transfer Öğrenmesi Kullanarak Çevrimiçi Türkçe El Yazısı Tanıma

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2022
Düzeltilme: 21/12/2022
Kabul: 21/12/2022

Anahtar Kelimeler

Çevrimiçi El Yazısı
Tanıma
Derin Öğrenme
Transfer Öğrenme,
Türkçe El Yazısı Tanıma
CNN-BLSTM

Öz

Bu çalışmada, Türkçe çevrimiçi el yazısı için geliştirilen bir tanıma sistemi anlatılmaktadır. Çok katmanlı Yapay Sinir Ağlarını eğitmek için gereken çok miktardaki verinin temini amacıyla Transfer Öğrenme yöntemi kullanılarak bir CNN-BLSTM ağı eğitilmiştir. Bu amaçla ilk olarak standart veri setlerinden olan IAM-On İngilizce el yazısı veri seti ile eğitilen modele, ardından daha küçük boyutlu bir Türkçe el yazısı veri seti ile ince ayar yapılmıştır. 2,041 Türkçe kelime üzerinde yapılan testlerde, ince ayar sayesinde karakter tanıma oranının %49 dan %85 e yükseldiği görülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre Transfer Öğrenme yöntemi Türkçe el yazısı tanıma problemi için uygun bir çözüm sayılabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Handwriting recognition is an active research area where symbols, characters, words or lines of words written by human writers are recognized by computer systems. Online handwriting is a digital form of handwriting generated by a pen tip moving on a special digitizer surface. Traces of the movements are represented as a time series of coordinates. Timing of the movements, pressure of the pen and pen status as up or down can be captured along with the coordinates. In contrast, offline handwriting is a modality where handwritten text is represented as image data. Increasing use of mobile devices, interactive whiteboards and other handwriting capturing devices make online

handwriting a daily modality to a wider audience. Although the performance of recognition systems is improving steadily, there are still many challenges to be faced before declaring the online handwriting recognition problem to be solved. In the earlier years, much of this research was focused on the recognition of derivations of Latin alphabet, and especially of English, but other scripts started to gain attention in recent years [1], [2], [3], [4]. However, research on Turkish script is still very limited. This is mostly due to lack of sufficiently large datasets for both online and offline Turkish handwriting recognition. A possible solution to the problem of insufficient training data can be Transfer Learning where data from a similar domain is used for pretrain a system and then fine-tuning the

system with available scarce data of the target domain. In this work, we develop a recognition system for online Turkish handwritten words. We use the Transfer Learning approach to overcome the data scarcity problem of Turkish handwriting samples and to achieve better recognition accuracy. The system obtains recognition rates comparable to state-of-art using some Deep Learning (DL) techniques like Convolutional Neural Networks (CNN) and Bidirectional Long-Short Memory Networks (BLSTM).

2. RELATED WORK (İLİŞKİLİ ÇALIŞMALAR)

Emergence of studies on online handwriting recognition dates back to the 1990s [1]. Starting from isolated characters and symbols, recognition systems working at word, line and even paragraph levels have been developed in the course of time [5], [6], [7]. Although Latin-alphabet based scripts have been getting much of the attention, the number of studies on recognition of many other writing systems increased recently [8], [2], [3], [42]. 2 Different machine learning techniques like Hidden Markov Models (HMM), Support Vector Machines (SVM) and Artificial Neural Networks (ANN) and their combinations are employed in online handwritten text recognition systems in the literature [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. HMM based recognizers have been particularly very popular due to their capability of modelling time series effectively [17], [18], [19], [20]. Recognition performances improved dramatically by introduction of the Deep Learning methods especially in problems where a large amount of training data is available [21], [22], [23]. Yet, HMM based systems are still viable in cases of limited data and computational resources [24] and particular scripts like Arabic [25], [26]. Recurrent Neural Networks and their variants are successfully used for tasks regarding sequential data like online handwriting or speech where data is represented as time series [27], [28], [41]. Addition of memory units to RNNs solved the so-called “vanishing gradient problem” and improved their capability of modeling temporal dependencies in data. In particular, long shortterm memory neural networks (LSTMs) and their variants have been very successful in both online and offline handwritten and machine printed text recognition problems in recent years [7], [21], [22]. Research about recognition of handwritten Turkish text is very limited. There are studies on offline Turkish character recognition with some constraints applied on the style or the case of writing [29], [30], [31]. In [32], a HMM system which was previously

developed for English, is used for offline handwritten Turkish text recognition. Some characters with dots, cedilla and breve which are specific to the Turkish alphabet are mapped to their English counterparts. A Turkish prefix parser to detect non-Turkish word prefixes during decoding is employed instead of using a lexicon. A 56% top-10 word recognition rate is reported using a 17,000-word lexicon. Recognition accuracy decreases to around 40% when the Turkish prefix parser is used. [33] uses HMMs in a character-based word recognition system for offline lowercase mixed-style handwritten Turkish words. The reported recognition rate is 84% using a lexicon of size 2,500. [31] proposes a machine printed character recognizer developed using ANNs. The character recognition rate is reported as 95.2% for a proprietary dataset. Another character recognizer for offline Turkish Handwriting is proposed in [29]. Using a classifier based on Size-Dependent Negative Log-Likelihood, a recognition rate of 93.4% is achieved on a test set of 6,322 samples. A CNN based recognizer is proposed for Turkish handwritten character recognition in [34]. Its recognition accuracy is reported as 96.07%. In a recent work [34], a CNN-based system is trained to recognize Turkish handwritten characters and achieved 96.0% recognition accuracy on a test set of 5165 samples. [35] presents a comprehensive evaluation of various HMM architectures and parameters for online handwriting recognition tasks. A word recognition rate of 94% is achieved using a 1,000-word lexicon with character HMMs. Another HMM system is proposed in [24] where the data scarcity problem is overcome by using a larger English dataset along with a Turkish dataset containing words taken from elementary school textbooks. 91.7% word recognition accuracy is reported for a middle-sized, 1,950-word lexicon task and 800 test samples. When the lexicon size is increased to 12,500, recognition accuracy is measured as 67.9%, using a bi-gram language model based on word stems and suffixes. In a recent study, a CNN-BLSTM network which is pre-trained with a synthetic dataset and fine-tuned with the Turkish dataset used in [24] achieved 88% character recognition accuracy in an open dictionary recognition task on that Turkish dataset [40].

3. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

3.1. Datasets (VERİSETLERİ)

There are several online handwriting datasets which are publicly available.

The IAM 3 On-Line Handwriting Database (IAM-On DB) is a large online handwriting dataset containing forms of handwritten English text acquired using a special system which traces movements of pen on a whiteboard [36]. It is used to train and test handwritten text recognizers and to perform writer identification and verification experiments in many studies [23], [7], [22], [37]. There are 13,049 lines written by 221 writers in the dataset. It contains 86,272 word instances from a 11,059-word dictionary. Pen coordinates, timing and pen-up/down status for each stroke of each sample are stored in XML files. Ground-truth for each sample is given in a text file separately. Elementary Turkish (ET) dataset is a collection of around 10,000 isolated words written by 113 writers, including children [24]. Words are selected from a 2,089-word lexicon derived from 1st and 2nd Grade Turkish textbooks. It is split into three sets where writers are not overlapping. The train set contains 7,360 samples from a 1956-word lexicon by 79 writers whereas the test set contains 2,500 samples from a 2089-word lexicon written by 34 writers. The train set lexicon covers the test set lexicon. Each sample is represented with its coordinates and pen status as up or down in the ET dataset.

3.2. Data (VERİ)

Each sample of the IAM-On is made of a line composed of strokes. Each stroke is represented with a collection of points. Points of a stroke are defined with their x and y coordinates, creation time with respect to the creation time of the first point of that stroke and pen status which always takes the up value except for the last point of that stroke, which takes the down value. We apply some basic preprocessing to eliminate variations in data. First we use linear regression to detect the baseline of a sample and de-skew line by rotating according to baseline angle. Points are normalized by subtracting mean coordinates values and division by standard deviation of y coordinates. We resample strokes to obtain equi-distant points and finally up-sample strokes which are shorter than a threshold. After the preprocessing step we use the following elements to represent points in a stroke:

- x- and y-coordinates,
- differences from the x- and y-coordinates of the next point
- pen status.

3.3. Recognition System (TANIMA SİSTEMİ)

We propose a CNN-BLSTM network for recognition of online Turkish handwriting. Hybrid systems where a CNN is used for feature extraction and a RNN or its variant is used as a classifier are widely used for sequence learning tasks. We take the same approach and use a CNN-BLSTM network for recognition of the online Turkish handwriting. Since size of the ET dataset is not large enough to train a deep network, we use transfer learning approach to make use of data from a larger dataset i.e. IAM-On. Transfer learning (TL) is a technique for exploiting information obtained during a learning process to improve another learner from a different but related domain. TL is preferred especially in cases where training data is limited. TL has been in use for various problems like text sentiment classification, image classification, and text recognition [38], [39]. Once a DL network is trained with data from a related domain, TL can be applied by freezing some of the layers of which knowledge is accumulated as weights. Freezing prevents update of the weights. Other layers which will continue learning can be reset or keep learned weights before the network is trained with new data from the target domain. Another method is to fine tune the system with the new data. Here, weights of all layers are updated according to the information learned from the new data. When the domains are similar, fine tuning becomes a more preferable method.

4. EXPERIMENTS (DENEYLER)

4.1. Experimental setup (DENEY ORTAMI)

In [21], IAM-On dataset is split into four subsets as a training set, a test set, a validation set to be used during training (validation-1), and a validation set to be used for language modeling (validation-2). However, the names of samples in each subset are not published, only information about sizes of subsets are available. So, we split the IAM-On dataset randomly according to given subset sizes. As for the ET dataset, we use approximately 65% of the data in transfer learning and fine tuning. 10% of the samples is used for validation during training and 25% of the samples is used to evaluate the final system. Table 1 shows our dataset split sizes for the two datasets.

Table 1. Subset sizes after split of the IAM-On and ET datasets (IAM-On ve ET veri setlerinin bölünmesi sonrası büyüklükleri)

Dataset	Train	Test	Val.-1	Val.-2
IAM-On (lines)	5,364	3,859	1,438	1,518
ET (words)	5,124	2,041	1,000	-

Performance evaluation metrics of the proposed system are Character Error Rate (CER) and Word Error Rate (WER) percentages that are based on the Edit Distance. Edit distance is calculated as the minimum number of edits with substitution, insertion and deletion of characters from the reference string to the output, normalized by the number of reference characters. WER is computed in a similar way.

We conducted a series of experiments with different network architectures and parameters to find the system with highest recognition accuracy on the IAM-On testset. Accordingly, our network and its parameters are decided as explained below.

The network architecture contains two parts; i) a CNN network to extract features from the data, ii) a

BLSTM network to classify the features and to recognize the text. The feature extraction network is made of two blocks containing three Convolutional layers each. Batch Normalization is applied after each Convolutional layer. After each block comes an average pooling layer to downsample data representation using a window size of 2. The classifier network has four BLSTM networks stacked together. Each BLSTM layer has one forwards working and one backward working LSTM layer outputs of which are concatenated. Finally, a softmax layer calculates the probability of each symbol in the recognition alphabet. There are 83 unique symbols used in IAM-On samples. The ET dataset contains Turkish letters, upper and lower case and two more symbols. We merge the two symbol sets to obtain a recognition alphabet of 97 symbols. CTC loss is calculated using predicted labels from the softmax layer and the ground truth labels. Activation function is ReLU for all trainable layers of the system. Kernels of layers are started using the He uniform variance scaling initializer.

Details of the network layers are presented in Table 2.

Table 2. The network architecture (Ağ mimarisi)

Layer type	Kernel size	# Kernels	# Units	Pool Size
Input	-	-	-	-
Conv1D	7	60	-	-
Batch Norm	-	-	-	-
Conv1D	5	90	-	-
Batch	-	-	-	-
Conv1D	5	120	-	-
Batch Norm	-	-	-	-
Average Pooling	-	-	-	2
Conv1D	3	120	-	-
Batch Norm	-	-	-	-
Conv1D	3	160	-	-
Batch Norm	-	-	-	-
Conv1D	3	200	-	-
Batch Norm	-	-	-	-
Average Pooling	-	-	-	2
BLSTM	-	-	60	-
BLSTM	-	-	60	-
BLSTM	-	-	60	-
BLSTM	-	-	60	-
Batch Norm	-	-	-	-
Dense	-	-	93	-

The network is implemented using the TensorFlow libraries whereas the experiments are run on a NVIDIA GeForce RTX 2060 graphical processing unit (GPU) card. The network is trained to minimize the CTC loss function. We use the RMSprop optimization algorithm with an initial learning rate of 0.001 and mini batches of size 20. Training is stopped when the loss on the validation set does not improve after 20 consecutive epochs.

4.2. Experiments (Deneyler)

After the network architecture and its parameters are decided, we apply the transfer learning technique by fine tuning the trained model to obtain a recognition system for the ET dataset.

As it is explained in Section 4.1, IAM-On dataset has two validation subsets one of which is reserved for language modeling originally. We first train the network with only the training set. Then, we add the validation-2 set to the training set and obtain an extended training set containing 6,882 line samples. We report results from evaluation of these systems on both the IAM-On and ET test sets in Table 3. According to the results, the proposed system obtains 85% character recognition accuracy on IAM-On test set. Its performance on the ET test set before the fine tuning process is measured as 44% character recognition accuracy. Training with more data increases recognition rate by 3.5% for IAM-On samples by reaching 88%. Similarly, it has a positive effect on recognition rate of the ET samples.

Table 3. Recognition accuracies of systems trained with the IAM-On dataset (IAM-On ile eğitilen sistemlerin doğruluk değerleri)

Train set	Test set	Recognition error rate	
		CER	WER
IAM-On train set	IAM-On test set	0.15	0.49
IAM-On train set + validation-2 set	IAM-On test set	0.12	0.41
IAM-On train set	ET test set	0.56	1.20
IAM-On train set + validation-2 set	ET test set	0.51	1.16

We run two more experiments where a trained network is fine-tuned with the ET training samples. After completion of the transfer learning part, the final system is evaluated on the ET test set.

Results of that evaluation are presented in Table 4.

Table 4. Results from the transfer learning experiments (Transfer Öğrenme deneylerinin sonuçları)

Train set	Test set	Recognition error rate	
		CER	WER
IAM-On train set	ET test set	0.16	0.57
IAM-On train set + validation-2 set	ET test set	0.15	0.54

After applying fine tuning to the system which is previously trained with the IAM-On extended training set, recognition rate of the ET samples is measured as 85%. The other system which is trained with only the IAM-On training set achieves almost the same accuracy.

5. DISCUSSION

According to results from Table 3, training with more data brings performance improvement on IAM-On test set, which is an expected situation. However, using the extended set has almost no effect on recognition rate of the ET test samples. Based on that, we can deduce the ET samples are significantly different from the IAM-On samples.

After the fine tuning is applied, recognition rate of the ET samples increases significantly for both networks. Actually, CER of fine-tuned networks on the ET are almost equal to CER measured in recognition of IAM-On samples by the initial networks of Table 3. Based on these, we can say that the fine tuning approach successfully increases the system performance.

Much of the errors are due to confusion of visually similar characters or character groups like k-h, r-n, m-m, P-D. Another observation we make from the output of the recognizers is that Turkish letters that do not exist in the English alphabet are recognized considerably well. Even the least frequent characters like ü and ö are recognized correctly in many samples.

The difference between CER and WER percentages which is observed in all of the experiments indicates that only a few characters are misrecognized in each misrecognized word.

There are several works using the IAM-On dataset for handwriting recognition in the literature. In [21], Graves et al. report 11.5% CER on the IAM-On test set using a BLSTM network with a CTC layer. Frinken et al. obtain 12.3% CER using a bi-gram language model [37], using a similar deep architecture. In [7], Carbune et al. obtain a record-low CER of 4.0% by using a BLSTM-CTC network along with a 7-gram language model and some handcrafted features and heuristics. Comparing our results (12.0% CER) with the literature, we can say that the proposed system is on par with the state-of-the-art. The positive impact of using a CNN network to extract better features can be deduced, especially when the lack of a language model is considered.

As for recognition of online Turkish handwriting, [24] trains a system and evaluates it using the ET dataset. It reports 91.7% word recognition accuracy for a middle-sized, 1,950-word lexicon task and 800-sample test set. Our work is not directly comparable to that one since it is a closed-dictionary task (lexicon size 1,956) tested on a different, smaller portion of the data.

Taking an approach similar to the method proposed in this work, a CNN-BLSTM network, which is pre-trained with a synthetic dataset and fine-tuned with the ET train samples, achieved 12% CER and 44% WER on ET test set in [40]. Our results are approximately equal to those last results while we use a less complex method.

6. CONCLUSION

This work presents an online handwriting recognition system for Turkish. The system achieves state-of-art results comparable to those published in the literature. We train CNN-BLSTM networks using the standard IAM-On dataset. Later we adopt a transfer learning approach via a fine tuning process where already trained networks are further trained with Turkish handwriting samples. Fine tuning increases recognition accuracy of the final system on 2,041 Turkish samples from 49% to 85%. We conclude that the fine tuning technique provides a solution to the data scarcity problem of Turkish handwriting recognition. Using a language model, training with even larger data and post-processing the results can improve the system performance dramatically. Using data augmentation techniques can be useful as well.

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)

Esma Fatma BİLGİN TAŞDEMİR: 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] R. Plamondon and S. N. Srihari, "On-line and off-line handwriting recognition: A comprehensive survey", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach.Intell.*, vol. 22, no. 1, pp. 63–84, 2000.
- [2] B. M. Al-Helali and S. A. Mahmoud, "Arabic online handwriting recognition (AOHR): A survey", *ACM Comput. Surv.*, vol. 50, no. c3, pp. 33:1–33:35, 2017.
- [3] N. Tagougui, M. Kherallah, and A. M. Alimi, "Online Arabic handwriting recognition: a survey", *IJDAR*, vol. 16, no. 3, pp. 209–226, 2013.
- [4] D. S. Doermann and S. Jaeger, Eds., *Arabic and Chinese handwriting recognition - SACH 2006 Summit* College Park, MD, USA, September 27-28, 2006 Selected Papers, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4768. Springer, 2008.
- [5] A. Priya, S. Mishra, S. Raj, S. Mandal, and S. Datta, "Online and offline character recognition: A survey", in *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2016, pp. 0967–0970.
- [6] M. Liwicki and H. Bunke, "Handwriting recognition of whiteboard notes", In *Proceedings of the 12th Conference of the International Graphonomics Society*, 2005, pp. 118–122.

- [7] V. Carbone, P. Gonnet, T. Deselaers, H. A. Rowley, A. N. Daryin, M. Calvo, L. Wang, D. Keysers, S. Feuz, and P. Gervais, “Fast multi-language lstm-based online handwriting recognition”, *Int. J. Document Anal. Recognit.*, vol. 23, no. 2, pp. 89–102, 2020.
- [8] X.-Y. Zhang, Y. Bengio, and C.-L. Liu, “Online and offline handwritten Chinese character recognition: A comprehensive study and new bench-mark”, *Pattern Recognition*, vol. 61, pp. 348–360, 2017.
- [9] S. Jager, S. Manke, J. Reichert, and A. Waibel, “Online handwriting recognition: the NPen++ recognizer”, *IJDAR*, vol. 3, no. 3, pp. 169–180, 2001.
- [10] S. Garcia-Salicetti, B. Dorizzi, P. Gallinari, and Z. Wimmer, “Maximum Mutual information training for an online neural predictive handwritten word recognition system”, *IJDAR*, vol. 4, no. 1, pp. 56–68, 2001.
- [11] E. Caillault and C. Viard-Gaudin, “Mixed discriminant training of hybrid ANN/HMM systems for online handwritten word recognition”, *IJPRAI*, vol. 21, no. 1, pp. 117–134, 2007.
- [12] T. M. T. Do and T. Artieres, “Maximum margin training of gaussian HMMs for handwriting recognition”, in *10th International Conference On Document Analysis and Recognition, ICDAR 2009, Barcelona, Spain, 26-29 July 2009, 2009*, pp. 976–980.
- [13] J. Schenk and G. Rigoll, “Novel hybrid NN/HMM modelling techniques for on-line handwriting recognition”, in *10th International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, IWFHR 2006, IAPR., La Baule, France, Oct 2006, 2006*, pp. 619–6230.
- [14] N. Gauthier, T. Artieres, P. Gallinari, and B. Dorizzi, “Strategies for combining on-line and off-line information in an on-line handwriting recognition system”, in *6th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR 2001, 10-13 September 2001, Seattle, WA, USA, 2001*, pp. 412–416.
- [15] S. Marukat, T. Artieres, P. Gallinari, and B. Dorizzi, “Sentence recognition through hybrid neuro-markovian modeling”, in *6th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR 2001, 10-13 September 2001, Seattle, WA, USA, 2001*, pp. 731–737.
- [16] M. Schenkel, I. Guyon, and D. Henderson, “On-line cursive script recognition using time-delay neural networks and Hidden Markov Models”, *Mach. Vis. Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 215–223, 1995.
- [17] J. Hu, S. G. Lim, and M. K. Brown, “Writer independent on-line handwriting recognition using an HMM approach”, *Pattern Recognition*, vol. 33, no. 1, pp. 133–147, 2000.
- [18] A. Biem, “Minimum classification error training for online handwriting recognition”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 28, no. 7, pp. 1041–1051, 2006.
- [19] M. Liwicki and H. Bunke, “IAM-OnDB - an on-line English sentence database acquired from handwritten text on a whiteboard”, in *Eighth International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR 2005, 29 August - 1 September 2005, Seoul, Korea, 2005*, pp. 956–961.
- [20] M. Liwicki, A. Graves, H. Bunke, and J. Schmidhuber, “A novel approach to on-line handwriting recognition based on bidirectional long short-term memory networks”, in *Proceedings of the 9th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR, 2007*, pp. 367–371.
- [21] A. Graves, S. Fernández, M. Liwicki, H. Bunke, and J. Schmidhuber, “Unconstrained on-line handwriting recognition with recurrent neural networks”, in *Advances in Neural Information Processing Systems 20, Proceedings of the Twenty-First Annual Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS, Vancouver, British Columbia, Canada, December 3-6, 2007, 2007*, pp. 577–584.
- [22] A. Graves, M. Liwicki, S. Fernandez, R. Bertolami, H. Bunke, and J. Schmidhuber, “A novel connectionist system for unconstrained handwriting recognition”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 31, no. 5, pp. 855–868, 2009.
- [23] M. Liwicki, A. Graves, H. Bunke, and J. Schmidhuber, “A novel approach to on-line handwriting recognition based on bidirectional long short-term memory networks”, in *Proceedings of the 9th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR 2007, 2007*.

- [24] E. F. B. Tasdemir and B. A. Yanikoglu, “Large vocabulary recognition for online Turkish handwriting with sublexical units”, *Turkish J. Electr.Eng. Comput. Sci.*, vol. 26, no. 5, pp. 2218–2233, 2018.
- [25] F. Biadisy, J. El-Sana, and J. Habash, “Online Arabic handwriting recognition using Hidden Markov Models”, in *Tenth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, IWFHR 2007*, IAPR. New York, USA, 2006, 2006.
- [26] H. A. A. Alshafy and M. E. Mustafa, “HMM based approach for online Arabic handwriting recognition”, in *14th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2014*, Okinawa, Japan, November 28-30, 2014. IEEE, 2014, pp. 211–215.
- [27] T. Robinson, M. Hochberg, and S. Renals, *The Use of Recurrent Neural Networks in Continuous Speech Recognition*. Boston, MA: Springer US, 1996, pp. 233–258.
- [28] M. Husken and P. Stagge, “Recurrent neural networks for time series classification”, *Neurocomputing*, vol. 50, pp. 223–235, 2003.
- [29] A. Capar, K. Tasdemir, O. Kilic, and M. Gokmen, “A Turkish handprint character recognition system”, in *Computer and Information Sciences -ISCIS 2003*, 18th International Symposium, Antalya, Turkey, November 3-5, 2003, Proceedings, 2003, pp. 447–456.
- [30] K. Kaplan, H. M. Ertunc, and E. Vardar, “Handwriting character recognition by using fuzzy logic”, *Firat University Turkish Journal of Science & Technology*, vol. 12, pp. 71 – 77, 2017.
- [31] S. U. Korkmaz, G. Kirçiç eği, Y. Akinci, and V. Atalay, “A character recognizer for Turkish language”, in *7th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2003)*, 2-Volume Set, 3-6 August 2003, Edinburgh, Scotland, UK, 2003, pp. 1238–1241.
- [32] B. Yanikoglu and A. Kholmatov, “Turkish handwritten text recognition: a case of agglutinative languages”, in *Document Recognition And Retrieval X*, 22-23 January 2003, Santa Clara, California, USA, Proceedings, 2003, pp. 227–233.
- [33] M. Şekerci, “Turkish connected and slant handwritten recognition system”, Master’s thesis, Trakya Üniversitesi, 2007.
- [34] A. T. Kabakus and P. Erdogmus, “A novel handwritten turkish letter recognition model based on convolutional neural network”, *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 33, no. 21, 2021.
- [35] E. Vural, H. Erdogan, K. Oflazer, and B. A. Yanikoglu, “An online handwriting recognition system for Turkish”, in *Document Recognition And Retrieval XII, DRR 2005*, San Jose, California, USA, January 16-20, 2005, Proceedings, 2005, pp. 56–65.
- [36] M. Liwicki and H. Bunke, “Iam-On DB - an on-line English sentence database acquired from handwritten text on a whiteboard”, in *Eighth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2005)*, 29 August - 1 September 2005, Seoul, Korea. IEEE Computer Society, 2005, pp. 956–961.
- [37] V. Frinken and S. Uchida, “Deep BLSTM neural networks for unconstrained continuous handwritten text recognition”, in *13th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR 2015*, Nancy, France, August 23-26, 2015. IEEE Computer Society, 2015, pp. 911–915.
- [38] K. R. Weiss, T. M. Khoshgoftaar, and D. Wang, “A survey of transfer learning”, *J. Big Data*, vol. 3, p. 9, 2016.
- [39] S. Niu, Y. Liu, J. Wang, and H. Song, “A decade survey of transfer learning (2010-2020)”, *IEEE Trans. Artif. Intell.*, vol. 1, no. 2, pp. 151–166, 2020.
- [40] E. F. B. Tasdemir, “Online Turkish Handwriting Recognition Using Synthetic Data”, *European Journal of Science and Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 649-656, 2021.
- [41] B. Tombaloğlu and H. Erdem, “Turkish Speech Recognition Techniques and Applications of Recurrent Units (LSTM and GRU)”, *Gazi University Journal of Science*, vol. 34, no. 4, 1035-1049, 2021.
- [42] C. Yao and G. Cheng, “Approximative Bayes optimality linear discriminant analysis for Chinese handwriting character recognition”, *Neurocomputing*, vol. 207, issue C (September 346–353, 2016).

Structure and Spectroscopic Studies of Bis Azo Compounds with S/SO₂ Bridges and Containing Cyclic-1,3-Dicarbonyl Groups

Gülnihal ERTEN^{1*} , Naki ÇOLAK¹ 

¹Hitit University, Faculty of Science and Art, Department of Chemistry, Çorum Turkey

Article Info

Research article

Received: 18/04/2023

Revision: 13/07/2023

Accepted: 14/07/2023

Keywords

Bis azo dyes

Spectroscopic studies

Dimedone

Tautomerism

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 18/04/2023

Düzeltilme: 13/07/2023

Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Bis azo boyalar

Spektroskopik çalışmalar

Dimedon

Tautomerizm

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

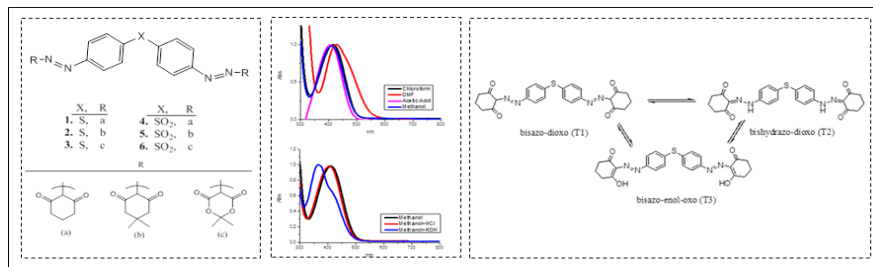


Figure A: Bis azo compounds (1-6) containing S/SO₂ and cyclic-1,3-dicarbonyl groups / **Şekil A:** S/SO₂ ve siklik-1,3-dikarbonil grupları içeren bis azo bileşikler (1-6)

Highlights (Önemli noktalar)

- Six new bis azo dyes with S/SO₂ bridge containing cyclic-1,3-dicarbonyl groups were obtained from dianiline derivatives. / Dianiline türevlerinden siklik-1,3-dikarbonil grupları içeren S/SO₂ köprülü altı yeni bis azo boyası elde edilmiştir.
- The structure of the bis azo dyes was investigated by using, FT-IR, ¹H-NMR, LC-MS/MS and UV-Visible spectrophotometric methods. / Bis azo boyalarının yapısı FT-IR, ¹H-NMR, LC-MS/MS ve UV-Visible spektrofotometrik yöntemler kullanılarak incelenmiştir.
- UV visible absorption spectra of bis azo dyes were investigated in different solvents and also in inorganic acidic-basic media. / Bis azo boyaların UV görünür absorpsiyon spektrumları, farklı çözücülerde ve ayrıca inorganik asidik-bazlı ortamda incelenmiştir.

Aim (Amaç): This study, it is aimed to synthesize new bis azo dyes that can be used in synthetic fibre dyeing and to obtain more bathochromic colours and higher tinctorial effect. / Bu çalışmada, sentetik elyaf boyamada kullanılacak yeni bis azo boyalarının sentezlenmesi ve daha batokromik renkler ve yüksek renklendirme etkisi elde edilmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): In our study, original bis azo dyes with biologically active and high tincture properties were brought to the literature by combining the two active compounds, S/SO₂ dianiline derivatives and cyclic-1,3-dicarbonyl groups, using the diazo-coupling method. / Çalışmamızda iki aktif bileşik olan S/SO₂ dianilin türevleri ve siklik-1,3-dikarbonil grupları diazo-eşleştirme yöntemi kullanılarak birleştirilerek biyolojik olarak aktif ve renklendirme özelliği yüksek orijinal bis azo boyalar literatüre kazandırılmıştır.

Results (Bulgular): Three tautomeric forms bis azo-dioxo (T1), bis hydrazo-dioxo (T2) and bis azo-enol-oxo (T3) were estimated for bis azo dyes regarding present FT-IR and ¹H-NMR data. According to the UV-Vis spectrum, it was observed a single maximum absorption peak in all solvents. / Bis azo-diokso (T1), bis hidrazo-diokso (T2) ve bis azo-enol-okso (T3) olmak üzere üç tautomerik form, mevcut FT-IR ve ¹H-NMR verilerine göre bis azo boyaları için tahmin edilmiştir. UV-Vis spektrumuna göre, tüm çözücülerde tek bir maksimum absorpsiyon zirvesi gözlemlendi.

Conclusion (Sonuç): In the ¹H-NMR Spectrum, we can say that our compounds are in bishidrazo-dioxo form. It has been observed generally that bis azo dyes containing the sulfonyl group have a more low wavelength as against the sulfo group in all solutions. According to the absorption data the compounds are thought to be mostly in the bis hidrazo-dioxo (T2) tautomeric form in the solution medium. The observed wavelength shouldering in basic medium shows that two different tautomeric forms coexist in the basic environment of dye solutions. / ¹H-NMR Spektrumunda bileşiklerimizin bishidrazo-diokso formunda olduğunu söyleyebiliriz. Genel olarak tüm çözeltilerde sülfonil grubu içeren bis azo boyalarının sülfonil grubuna göre daha düşük dalga boyuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. Absorpsiyon verilerine göre bileşiklerin çözelti ortamında çoğunlukla bis hidrazo-diokso (T2) tautomerik formda olduğu düşünülmektedir. Bazik ortamda gözlenen dalga boyu omuzlaması, boya çözeltilerinin bazik ortamında iki farklı tautomerik formun bir arada var olduğunu göstermektedir.



Structure and Spectroscopic Studies of Bis Azo Compounds with S/SO₂ Bridges and Containing Cyclic-1,3-Dicarbonyl Groups

Gülnehal ERTEN^{1*} , Naki ÇOLAK¹ 

¹Hitit University, Faculty of Science and Art, Department of Chemistry, Çorum Turkey

Article Info

Research article

Received: 18/04/2023

Revision: 13/07/2023

Accepted: 14/07/2023

Keywords

Bis azo dyes

Spectroscopic studies

Dimedone

Tautomerism

Abstract

A sequence of new bis azo dyes was synthesized using aromatic diamines with S/SO₂ bridges and cyclic-1,3-dicarbonyl compounds containing active methylene groups; 3,3-dimethyl-1,5-cyclohexadione (dimedone), 1,3-cyclohexadione and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione, and was obtained dyes **1-6**. Whether the reaction was complete and the purity of the compounds was controlled with TLC. The structure of the newly synthesized compounds was investigated by using, FT-IR, ¹H-NMR, LC-MS/MS and UV-Visible spectrophotometric methods, CH₃OH was used in the LC-MS/MS experiments, and the molecular masses of the compounds were seen as M and M⁺ protonated in the spectrum. In the absorption spectra of these compounds, the solvent effect by using different solvents and also the acid-base effect by adding HCl or KOH to the medium were investigated. The tautomeric equilibrium forms (enol-imine O-H...N, keto-amine O...H-N forms) of the compounds were investigated according to the electronic spectrum recorded in chloroform, dimethylformamide (DMF), acetic acid and methanol solvents. The results of the UV-visible and ¹H-NMR spectra indicated that the compounds in chloroform, dimethylformamide (DMF), acetic acid and methanol were found in the hydrazo tautomer (keto-amine O...H-N forms) of the proposed tautomeric forms.

S/SO₂ Köprülü ve Siklik-1,3-Dikarbonil Grupları İçeren Bis Azo Bileşiklerinin Yapısı ve Spektroskopik Çalışmaları

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 18/04/2023

Düzeltilme: 13/07/2023

Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Bis azo boyalar

Spektroskopik çalışmalar

Dimedon

Tautomerizm

Öz

S/SO₂ köprülü aromatik diaminler ve aktif metilen grupları içeren siklik-1,3-dikarbonil bileşikleri; 3,3-dimetil-1,5-sikloheksadion (dimedon), 1,3-sikloheksadion ve 2,2-dimetil-1,3-dioksan-4,6-dion kullanılarak bir dizi yeni bis azo boyası sentezlendi ve 1-6 boyaları elde edildi. Reaksiyonun tamamlanıp tamamlanmadığı ve bileşiklerin saflığı TLC ile kontrol edildi. Yeni sentezlenen bileşiklerin yapısı, FT-IR, ¹H-NMR, LC-MS/MS ve UV-Visible spektrofotometrik yöntemler kullanılarak incelenmiş, LC-MS/MS deneylerinde CH₃OH kullanılmış ve bileşiklerin molekül kütleleri spektrumda protonlanmış M ve M⁺ olarak görüldü. Bu bileşiklerin absorpsiyon spektrumlarında farklı çözücüler kullanılarak çözücü etkisi ve ortama HCl veya KOH eklenerek asit-baz etkisi de incelenmiştir. Bileşiklerin tautomerik denge formları (enol-imin O-H...N, keto-amin O...H-N formları), kloroform, dimetilformamid (DMF), asetik asit ve metanol çözücülerinde kaydedilen elektronik spektruma göre incelenmiştir. UV-görünür ve ¹H-NMR spektrumlarının sonuçları, kloroform, dimetilformamid (DMF), asetik asit ve metanoldeki bileşiklerin önerilen tautomerik formların hidrazo tautomerinde (keto-amin O...H-N formları) bulunduğunu gösterdi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aromatic diazonium compounds, which are very unstable structures, must give a coupling reaction with a nucleophile immediately after their synthesis, for this purpose active methylene groups can be used [1–3]. As a consequence of reactions among

primary amines and active methylene groups, products known in organic chemistry as diazonium groups are formed. These compounds exhibit different fastness and tinctorial properties according to the chemical structure of the diazo component and the coupling component. It is known that carbocyclic azo dyes have weaker tinctorial

properties compared to heterocyclic azo dyes [4]. In our study, we aimed to design bis azo dyes containing carbocyclic structures with better tinctorial properties.

Cyclohexane, cyclohexanol, and cyclohexanone azo dyes are utilized as preliminary compounds in the medicinal and chemical industries. Cyclohexanol and cyclohexanone used as intermediates for a lot of organic compounds (pharmaceutical agents, rubber or pesticide chemicals, etc.) are obtained from cyclohexane [5]. Dimedone is an active methylene component, therefore it gives easy coupling with diazonium salts and high enolization in the azo-coupling reaction. Brightly colorful hydrazones can be obtained by azo-coupling reactions [6]. As typical reactive 1,3-dicarbonyl compounds, cyclohexane-1,3-dione, and its analogies 5,5-dimethyl cyclohexane-1,3-dione (dimedone) and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione have been widely used in versatile synthetic reactions. The use of cyclic-1,3-dicarbonyls, which have significant synthetic potential reactions, as coupling components in azo compounds has also been documented [7]. Azo derivatives of cyclic-1,3-diketones are of great importance in fundamental and applied studies [8-10]. Azo dyes are of potential biological activities such as antifungal [11-17], antimycobacterial [18], antibacterial [19], anticancer-chemotherapy [20-22], anti-HIV [23-28], DNA-cleavage [29] and in the textile, food and cosmetics industry [30-32]. Azo dyes are interesting compounds that can be used in many applications due to their colors and different properties [33-34].

In this study, a series of bis azo dyes based on dianiline derivatives including 1,3-dicarbonyl groups, such as cyclohexane-1,3-dione, 5,5-dimethyl cyclohexane-1,3-dione (dimedone) and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione, were

synthesized and investigated solvatochromic behaviors of these bis azo dyes on UV-Vis spectra.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Experimental Equipment (Deneysel Ekipman)

All chemicals purchased with Merck and Aldrich chemical companies were used with no purification. Melting points were determined on a Stuart-SMP30 instrument with the capillary tube and were not corrected. Thermo Nicolet 6700 FT-IR spectrometer (on ATR) at Hitit University was used for infrared spectra (4000-400 cm⁻¹). Bruker Avance DPX-400 NMR device (solvent CDCl₃; internal standard TMS) at Firat University was used for proton nuclear magnetic resonance (¹H-NMR) spectra. LC-MS/MS was recorded by Thermo Scientific/TSQ Quantum Access Max at Scientific Technical Application and Research Center at Hitit University. Absorption spectra of compounds were recorded by a PG Instruments T80+ spectrophotometer.

2.2. General synthesis of the arylhydrazone derivatives (Arihidrazon türevlerinin genel sentezi)

Diazonium salt:

4,4'-thiodianiline (0,010 mol) or 4,4'-sulfonyldianiline (0.010 mol) was dissolved in conc. HCl (5.04 mL, 0.060 mol) and 20.00 mL of water. Then, the solution temperature was allowed down to around 0°C on an ice-salt bath and 1.38 g (0.020 mol) NaNO₂ solution in water was slowly dropped to the diamine solution and, continued stirring for at least 30 min. The temperature of the mixture should not exceed 0–5°C.

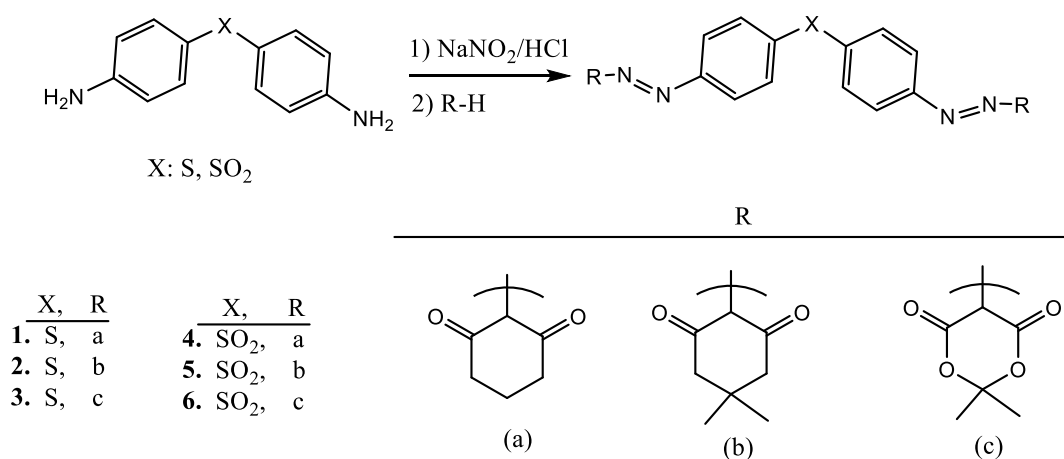


Figure 1. Synthesis of bis azo compounds (1-6) (Bis azo bileşiklerinin sentezi(1-6))

Azo coupling:

Cyclic-1,3-dicarbonyl compounds (0.010 mol) in ethanol (20 mL) were added in portions to solution of the diazonium salt at 0–5°C. This mixture maintained 3h. The solid product was precipitated with saturated sodium acetate solution under pH control. The obtained solid crude was filtered, air-dried and recrystallized using ethanol (for all compounds). The purities of the compounds were controlled with TLC (ethylacetate; n-hexane, 1:1).

2,2'-((thiobis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(cyclohexane-1,3-dione) (1)

This compound was synthesized using the 4,4'-thiodianiline and cyclohexane-1,3-dione compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 61% m.p: 233-235°C, Color: Brown; FT-IR (cm⁻¹): 3027 (Ar-H), 2952-2861 (aliph. C-H), 1690 and 1668 (2C=O), 1574 and 1496 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 15.47 (s, 2H, N-H), 7.55 (d, 4H, J=8.7 Hz, Ar-H), 7.40 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 2.75 (t, 8H, CH₂), 2.12 (m, 4H, CH₂).

2,2'-((thiobis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(5,5-dimethylcyclohexane-1,3-dione) (2)

This compound was synthesized using the 4,4'-thiodianiline and dimedone compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 52% m.p: 140-142°C, Color: Brown; FT-IR (cm⁻¹): 3055 (Ar-H), 2963-2926 (aliph. C-H), 1670 and 1616 (2C=O), 1595 and 1575 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 15.47 (s, 2H, NH), 7.54 (d, 4H, J=8.7 Hz, Ar-H), 7.38 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 2.64 (s, 4H, CH₂), 2.13 (s, 4H, CH₂), 1.16 (s, 12H, CH₃).

2,2'-((thiobis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione) (3)

This compound was synthesized using the 4,4'-thiodianiline and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 43% m.p: 178-180°C, Color: Orange; FT-IR (cm⁻¹): 3100 (Ar-H), 2996-2943 (aliph. C-H), 1743 and 1695 (2C=O), 1590 and 1516 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 13.70 (s, 2H, NH), 7.52 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 7.44 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 1.84 (s, 12H, CH₃)

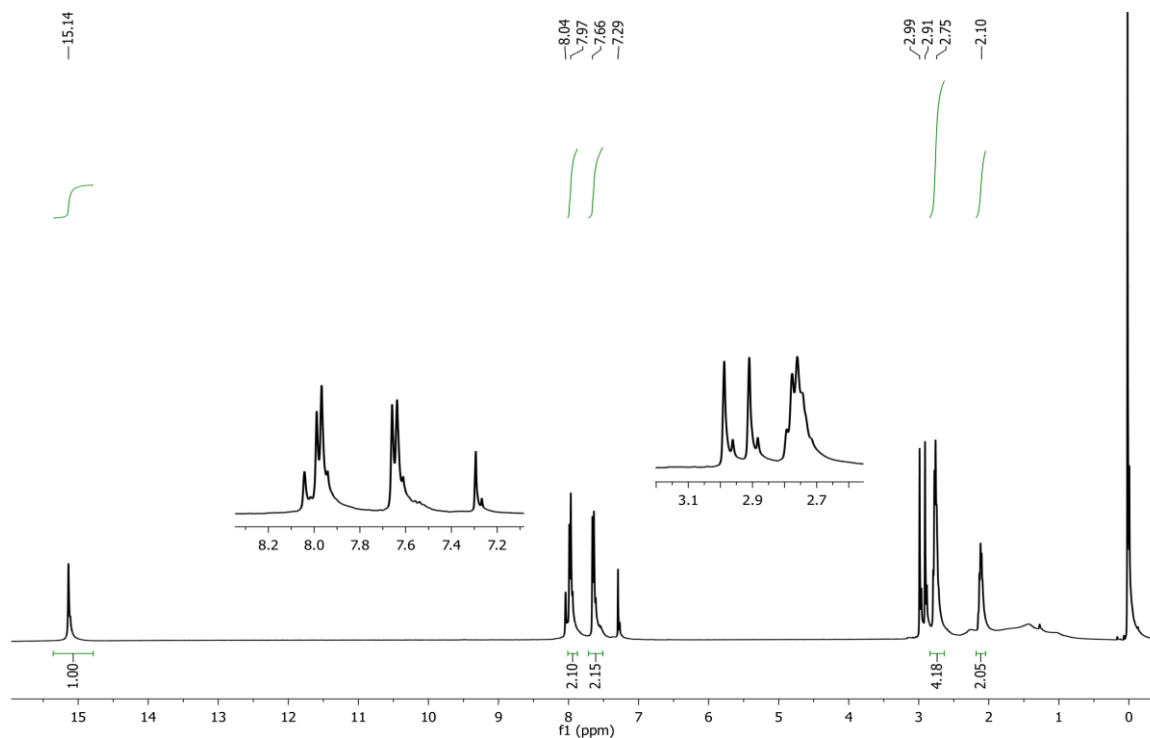


Figure 2. ¹H-NMR spectrum of compound 4 (Bileşik 4'ün ¹H-NMR spektrumu)

2,2'-((sulfonylbis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(cyclohexane-1,3-dione) (4)

This compound was synthesized using the 4,4'-sulfonyldianiline and cyclohexane-1,3-dione compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 60% m.p: 229-231°C, Color: Dark brown; FTIR (cm⁻¹): 3095 (Ar-H), 2941-2875 (aliph. C-H), 1668 and 1635 (2C=O), 1588 and 1573 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 15.14 (s, 2H, NH), 7.97 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 7.66 (d, 4H, J= 8.7 Hz, Ar-H), 2.75 (t, 8H, CH₂), 2.10 (m, 4H, CH₂).

2,2'-((sulfonylbis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(5,5-dimethylcyclohexane-1,3-dione) (5)

This compound was synthesized using the 4,4'-sulfonyldianiline and dimedone compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 79% m.p: 258-260°C, Color: Yellow; FT-IR (cm⁻¹): 3039 (Ar-H), 2955-2930 (aliph. C-H), 1683 and 1634 (2C=O), 1594 and 1580 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 15.13 (s, 2H, NH), 7.99 (d, 4H, J= 8.6 Hz, Ar-H), 7.66 (d, 4H, J= 8.6 Hz, Ar-H), 2.66 (s, 4H, CH₂), 2.16 (s, 4H, CH₂), 1.16 (s, 12H, CH₃)

2,2'-((sulfonylbis(4,1-phenylene))bis(hydrazin-2-yl-1-ylidene))bis(2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione) (6)

This compound was synthesized using the 4,4'-sulfonyldianiline and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione compounds by the same procedure mentioned above for the synthesis of general procedure for the synthesis of the arylhydrazone derivatives.

Yield: 81% m.p: 293-295°C, Color: Brown; FT-IR (cm⁻¹): 3102 (Ar-H), 2996-2939 (aliph. C-H), 1743 and 1696 (2C=O), 1590 and 1516 (2N=N); ¹H-NMR CDCl₃ (ppm): 13.56 (s, 2H, NH), 8.03 (d, 4H,

J= 8.8 Hz, Ar-H), 7.66 (d, 4H, J= 8.8 Hz, Ar-H), 1.84 (s, 12H, CH₃).

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. FT-IR and ¹H-NMR Studies (FT-IR ve ¹H-NMR çalışmaları)

Three tautomeric forms that bis azo-dioxo (T1), bis hydrazo-dioxo (T2) and bis azo-enol-oxo (T3) were estimated for bis azo dyes regarding present FT-IR and ¹H-NMR data. The structures of **1-6** are confirmed by the presence of corresponding signals of the FT-IR and ¹H-NMR protons spectra. The estimated tautomeric forms are shown in Figure 3 on the bis azo compound **1**.

In the FT-IR spectrum of bis azo compounds 1-6, it was observed characteristic absorption bands; for aromatic proton peaks around 3027, 3055, 3100, 3095, 3039 and 3102 cm⁻¹ respectively, for aliphatic C-H peaks between 2996–2861 cm⁻¹, for C=O peaks between 1743–1616 cm⁻¹, and for N=N peaks between 1595–1496 cm⁻¹. It is predicted regarding FT-IR analysis data that the synthesized bis azo dyes are bis azo-dioxo (T1) tautomeric form in solid [39].

3.2. UV-Vis Study

The UV-Vis spectra of the bis azo dyes were recorded in 4 different solvents; chloroform, DMF, acetic acid, and methanol (Figure 4). Solvents in different polarities were preferred in our study. In addition, the acidic or basic medium impacts on the absorption spectra of bis azo dyes were investigated [38]. For this purpose, 2–3 mL of HCl (0.1 M) or KOH (0.1 M) solution was added to the bis azo-methanol solution and scanned again. All measurements were recorded at room temperature (±25°C). The data obtained are listed in Table 1.

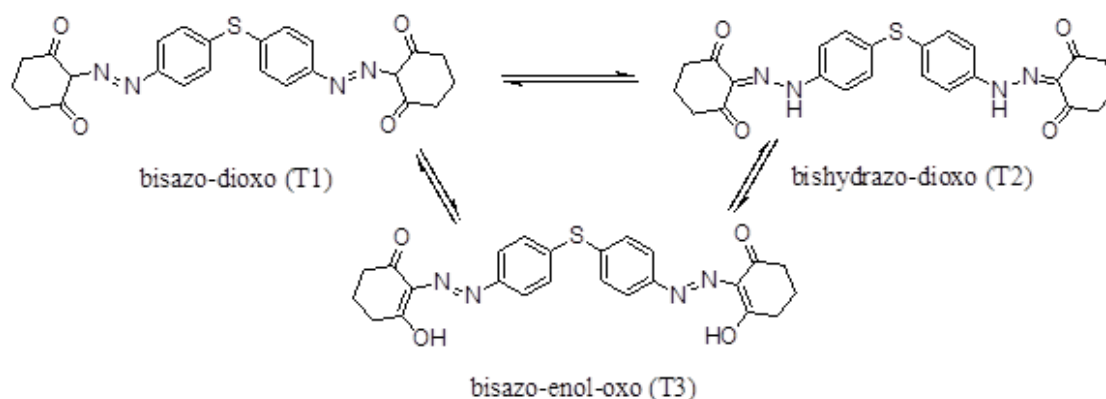


Figure 3. Tautomeric forms of compound **1**. (Bileşik **1**'in tautomerik formları)

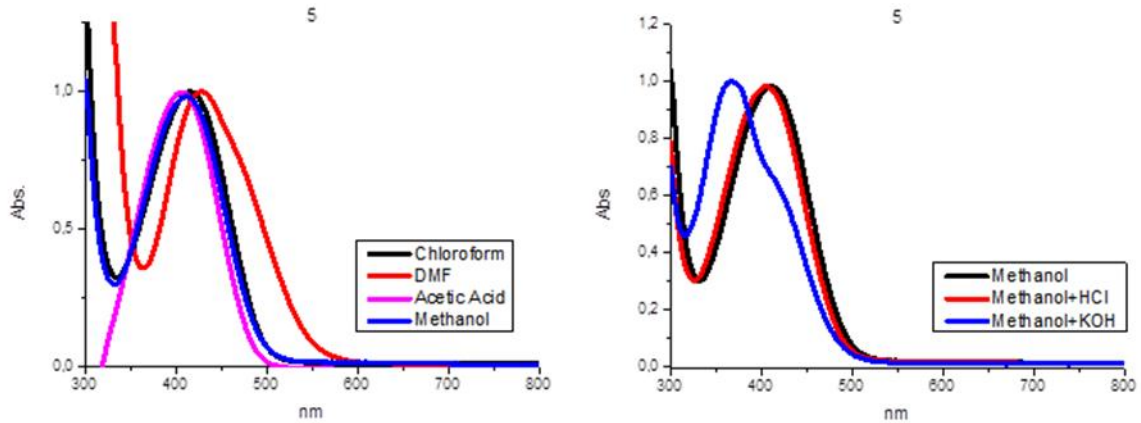


Figure 4. Absorption spectra of **5** in solution of different solvents (Farklı çözücülerin çözeltilisinde **5**'in absorpsiyon spektrumları)

3.3. LC MS/MS Study

While the mass spectra were taken, the samples were dissolved in methanol and then filtered through the 0.45 μ m syringe filter. The structures of

1-6 bis azo dyes were proposed considering these LC-MS/MS data and the molecular weight information. The molecular ion cluster was determined at m/z 462.03 for **1**, 517.00 for **2**, 525.10 for **3**, 494.89 for **4** (Figure.5), 550.22 for **5**, 556.88 for compound **6** respectively.

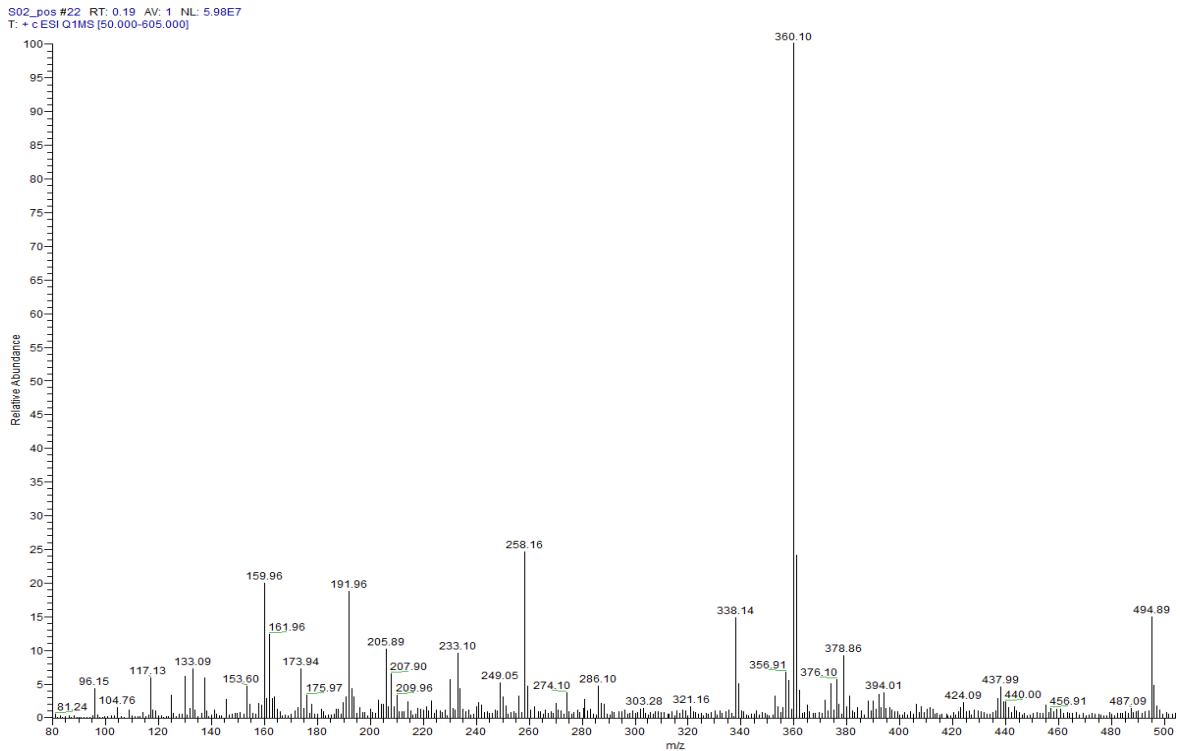


Figure 5. LC MS/MS spectrum of compound **4** (Bileşik **4**'ün LC MS/MS spektrumu)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In the $^1\text{H-NMR}$ Spectrum, we can say that our compounds are in bishydrazo-dioxo form because NH protons come out in a very low field between

15.56–13.70 ppm. In the literature, the reaction of cyclic-1,3-dicarbonyl compounds with the aryldiazonium compounds gave the arylhydrazo

derivatives and these compounds are in the arylhydrazo form via the intramolecular N-H-O=C-hydrogen bonding [36, 37]. Although bishydrazo-dioxo form (T2) appears in solution, in the FT-IR

spectra, the solvent-free medium, has not been observed either. These results are in agreement with the literature [40, 41].

Table 1. The maxima absorption points of bis azo dyes in different solvents (Bis azo boyalarının farklı solventlerdeki maksimum absorpsiyon noktaları)

λ_{\max} (nm)	Chloroform	DMF	Acetic acid	Methanol	Methanol+HCl	Methanol+KOH
1	440	450	428	442	435	379, 460 ^s
2	392	404	386	389	385	397, 486 ^s
3	440	452	430	433	421	376, 455 ^s
4	388	409, 500 ^s	381	385	379	398, 450 ^s
5	416	428	406	411	405	367, 419 ^s
6	390	401	382	392	386	403, 634 ^s

s: shoulder

Solvent polarity is one of the factors that cause changes in absorption values in UV-Vis spectra. A hypsochromic shift up to 6–10 nm was observed in acetic acid and a bathochromic shift (≥ 10 nm) in DMF compared to chloroform in all synthesized diazo dyes, besides no clear change in methanol. It has been observed generally that bis azo dyes containing the sulfonyl group have a more low wavelength as against the sulfo group in all solutions. According to the absorption data, it can be said that a single maximum absorption peak was observed in all solvents. This situation suggested that the bis azo dye solutions consisted of a single tautomeric form. According to our explanation based on the NMR data before, the compounds are thought to be mostly in the bis hydrazo-dioxo (T2) tautomeric form in the solution medium. Also, a shoulder peak at 500 nm is observed in the spectrum of compound 4 recorded in DMF. This situation suggests a mixture of the two tautomeric forms in DMF.

The acidic or basic medium impacts on the absorption spectra of dye solutions were investigated by adding HCl or KOH to the methanol solution. For all dye solutions, it has been observed hypsochromic shift (in values ranging from 4 to 8 nm) in absorption values in an acidic medium. Only a single absorption peak is observed in the acidic media spectra, suggesting that it is in a single tautomeric form. In basic medium, a bathochromic shift can be mentioned for all compounds, but long wavelength shouldering (>400 nm) was also observed in all recorded spectra. This situation shows that two different tautomeric forms coexist in the basic environment of dye solutions.

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)

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

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

Naki ÇOLAK: He analyzed the results and performed the writing process.

Deney 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] Albertin G, Antoniutti S, Boato M. Diazo Complexes of Osmium: Preparation of Binuclear Derivatives with Bis (Aryldiazene) and Bis (Aryldiazenido) Bridging Ligands. *Inorg. Chim. Acta*, 357 (2004) 1119–1133.

- [2] Raghu AV, Gadaginamath GS, Mathew NT, Halligudi SB, Aminabhavi TM. Synthesis and Characterization of Novel Polyurethanes Based on 4,4-[1,4-Phenylenediazene-2,1-Diyl]Bis(2-Carboxyphenol) and 4,4-[1,4-Phenylenedi-Diazene-2,1-Diyl]Bis(2-Chlorophenol) Hard Segments. *React. Func. Polym.* 67 (2007) 503–514.
- [3] Shchur IV, Khudina OG, Burgart YV, Saloutin VI, Grishina MA, Potemkin VA. Synthesis, Structure, and Complexing Ability of Fluoroalkylcontaining 2,2-(Biphenyl-4,4-Diyl)dihydrazono)Bis(1,3-Dicarbonyl) Compounds. *Russ. J. Org. Chem.* 43 (2007) 1781–1787.
- [4] Weaver MA, Shuttleworth L. Heterocyclic diazo components. *Dye Pigm.* 3 (1982) 81-121.
- [5] Urus S, Ozdemir M, Ceyhan G, Tumer M. Chemically Modified Silica-Gel With an Azo-Schiff Ligand and Its Metal Complexes with Cu(II), Co(II), Ni(II) and Mn(II): Applications as Catalysts on the Oxidation of Cyclohexane Under Microwave Power. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 42 (2012) 382–391.
- [6] Kitaev YP, Buzykin BI, (1974). *Gidrazony [Hydrazones]*, Nauka, Moscow, 416 pp. (in Russian).
- [7] Kost AN, Grandberg II. Progress in Pyrazole Chemistry. *Adv. Heterocycl. Chem.*, 6 (1966) 347-429.
- [8] Jeong MJ, Park JH, Lee C, Chang JY. Discotic Liquid Crystalline Hydrazone Compounds: Synthesis and Mesomorphic Properties. *Org. Lett.* 8 (2006) 2221–2224.
- [9] Chen Z, Wu Y, Gu D, Gan F. Nickel (II) and Copper (II) Complexes Containing 2-(2-(5-Substitued Isoxazol-3-Yl)Hydrazono)-5,5-Dimethylcyclohexane-1,3-Dione Ligands: Synthesis, Spectral and Thermal Characterizations. *Dyes Pigm.* 76 (2008) 624–631.
- [10] Sokolnicki J, Legendziewicz J, Amir Khanov W, Ovchinnikov V, Macalik L, Hanuza J. Comparative Optical Studies of Lanthanide Complexes with Three Types of Phosphoro-Azo Derivatives of B-Diketones. *Spec. Chim. Acta A.* 55 (1999) 349–367.
- [11] More MS, Joshi PG, Mishra YK, Khanna PK. Metal Complexes Driven from Schiff Bases and Semicarbazones for Biomedical and Allied Applications: A Review. *Mater. Today Chem.*, 14 (2019) 100195–100217.
- [12] Torres MJ, Criado A, Ruiz M, Llanos AC, Palomares JC, Aznar J. Improved Real-Time PCR for Rapid Detection of Rifampin and Isoniazid Resistance in Mycobacterium Tuberculosis Clinical Isolates. *Diag. Micro. Infects Disease.*, 45 (2003) 207-212.
- [13] Tian NZ, Zhou Y, Sun SG, Ding Y, Zhong LW. Synthesis of Tetrahedral Platinum Nanocrystals with High-Index Facets and High Electro-Oxidation Activity. *Sci. Mag.*, 316 (2007) 732-735.
- [14] Raja A, Rajendiran V, Maheswari PU, Balamuagan R, Kilner CA, Halcrow MA. Copper (II) Complexes of Tridentate Pyridylmethylethylenediamines: Role of Ligand Steric Hindrance on DNA Binding and Cleavage. *J. Inorg. Biochem.*, 99 (2005) 1717-1732.
- [15] Abdel-Rahman LH, Abu-Dief AM, Ismail M, Ismael NM. Synthesis, Characterization, and Biological Activity of New Mixed Ligand Transition Metal Complexes of Glutamine, Glutaric, and Glutamic Acid with Nitrogen Based Ligands. *Inorg. Nano-Metal Chem.*, 47 (2017) 467-480.
- [16] Maria CSL, Marcelle LF, Marcus VNS, Monica AP, Thatyana RAV, Maria G, Henriques MO. Synthesis and Anti-Mycobacterial Activity of (E)-N'-(mono substituted-benzylidene)isonicotino hydrazide Derivatives. *Eur. J. Med. Chem.*, 43 (2008) 1344-1347.
- [17] Samir AC, Edson FS, Marcus VN, Maria CSL, Felipe RV. Synthesis and Antimycobacterial Evaluation of New Trans-Cinnamic Acid Hydrazone Derivatives. *Bio. Org Med. Chem Lett.*, 18 (2008) 538-541.
- [18] Manjunatha B, Bodke YD, Nagaraja O, Nagaraju G, Sridhar MA. Coumarin-Benzothiazole Based Azo Dyes: Synthesis, Characterization, Computational, Photophysical and Biological Studies. *J. Mol. Struct.* 1246 (2021) 131170–131185.
- [19] Weldegebrerial GK. Synthesis Method, Antibacterial and Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles for Azo Dyes in Wastewater Treatment: A Review. *Inorg. Chem. Commun.* 120 (2020) 108140–108211.
- [20] Gaffer HE. Antimicrobial Sulphonamide Azo Dyes, *Color. Technol.*, 135 (2019) 484–500.
- [21] Kornis G, Katritzky AR. (ed. 1984) 1,3,4-Thiadiazoles in *Comprehensive Heterocyclic Chemistry*, Pergamon Press, Vol. 6, Part 4B, 545-578.
- [22] Allard N, Beaupre S, Aich BR, Najari A, Tao Y, Leclerc M. Synthesis and characterization of new poly (thieno[3,4-d]thiazole) derivatives for photovoltaic applications. *Macromolecules*, 44 (2011) 7184–7187.
- [23] Zonouzi A, Rezaei MH, Mirzazadeh R, Arjomand MR. Solvent-free Synthesis of

- Halogenated Furo[2,3-d] pyrimidines and Their Cytotoxic Activity on the T47D Breast Cancer Cell Line. *Organic Preparations and Procedures International*. 52 (2020) 374-380.
- [24] Zaky RR, Yousef TA. Spectral, Magnetic, Thermal, Molecular Modelling, ESR Studies and Antimicrobial Activity of (E)-3-(2-(2-Hydroxybenzylidene) Hydrazinyl)-3-Oxo-N(Thiazole-2-Yl)Propanamide Complexes. *J. Mol. Struct.* 1002 (2011) 76-85.
- [25] Santini C, Pellei M, Gandin V, Porchia M, Tisato F, Marzano C. Advances in Copper Complexes as Anticancer Agents *Chem. Rev.*, 114 (2014) 815-862.
- [26] Lu Y, Li CM, Wang Z, Ross CR, Chen J, Dalton JT, Li W, Miller DD. Discovery of 4-Substituted Methoxybenzoyl-Aryl-Thiazole as Novel Anticancer Agents: Synthesis, Biological Evaluation, and Structure-Activity Relationships. *J. Med. Chem.*, 52 (2009) 1701-1711.
- [27] Lombardo LJ, Lee FY, Chen P, Norris D, Barrish JC, Behnia K, Castaneda S, Cornelius LAM, Das J, Doweiko AM, Fairchild C, Hunt JT, Inigo I, Johnston K, Kamath A, Kan D, Klei H, Marathe P, Pang S, Peterson R, Pitt S, Schieven GL, Schmidt RJ, Tokarski J, Wen M-L, Wityak J, Borzilleri RM. Discovery of N-(2-Chloro-6-methyl-phenyl)-2-(6-(4-(2-hydroxyethyl)-piperazin-1-yl)-2-methylpyrimidin-4-ylamino)thiazole-5-carboxamide (BMS-354825), a Dual Src/Abl Kinase Inhibitor with Potent Antitumor Activity in Preclinical Assays. *J. Med. Chem.*, 47 (2004) 6658-6661.
- [28] Khan E, Gul Z, Shahzad A, Jan SM, Ullah F, Tahir MN. Coordination Compounds of 4,5,6,7-Tetrahydro-1H-Indazole with Cu(II), Co(II) and Ag(I): Structural, Antimicrobial, Antioxidant and Enzyme Inhibition Studies. *J. Coord. Chem.*, 70 (2017) 4054-4069.
- [29] Nagasundaram N, Govindhan C, Sumitha S, Sedhu N, Raguvaran K, Santhosh S, Lalitha A. Synthesis, Characterization and Biological Evaluation of Novel Azo Fused 2,3-Dihydro-1H-Perimidine Derivatives: In Vitro Antibacterial, Antibiofilm, Anti-Quorum Sensing, DFT, in Silico ADME and Molecular Docking Studies *J. Mol. Struct.* , 248 (2022) 131437-131449.
- [30] Gregory P. (2002). *Industrial Dyes: chemistry, Properties and Applications*, Wiley- VCH, Weinheim, 543-585.
- [31] Bamfield P, Hutchings MG. (2010). *Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry*, 2nd ed., RSC, Cambridge.
- [32] Zollinger H. (2003). *Color Chemistry: Synthesis, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments*, 3rd ed., Wiley-VCH, Weinheim.
- [33] Çatıkkas B, Aktan E, Yalçın E. Vibrational and electronic investigations, NLO, FMO analysis on a hetarylazoindole disperse dye by density functional theory. *J. Mol. Struct.*, 1117 (2016) 218-226.
- [34] Aysha T, El-Sedik, M, Megied SAE, Ibrahim H, Youssef Hrdina YR. Synthesis, Spectral Study and Application of Solid State Fluorescent Reactive Disperse Dyes and Their Antibacterial Activity, *Arab. J. Chem.*, 12 (2019) 225-235.
- [35] Dopanay K, Keleştemur U, Balcıoğlu S, Ateş B, Altundaş A. Synthesis, Reaction, and Evaluation of The Anticancer Activity of 6,7,8,9,-Tetrahydro-5h-Cyclohepta [4,5] Selenopheno [2,3-D] Pyrimidine Derivatives. *Tur J. Chem.*, 40 (2016) 631-640.
- [36] Drew MGB. Phenylhydrazone Derivatives of Dimedone: Hydrogen Bonding, Spectral (¹³C and ¹H Nuclear Magnetic Resonance) and Conformational Considerations. *Crystal and Molecular Structures Of 5,5-Dimethylcyclohexane-1, 2,3-Trione 2-(4-Methylphenylhydrazone) (1) and 5, 5-Dimethylcyclohexane-1,2,3-Trione 2-(4-Nitrophenylhydrazone) (2)*, *J Chem Soc. Perkin Trans II*, (1982) 1297-1303.
- [37] Mohareb RM, Al Farouk FO, Wardakhan WW. Uses of Dimedone for the Synthesis of New Heterocyclic Derivatives with Anti-Tumor, C-Met, Tyrosine, and Pim-1 Kinases Inhibitions. *Medicinal Chemistry Research*, 27 (2018) 1984-2003.
- [38] Silverstein RM, Bassler GC. Spectrometric identification of organic compounds. *J Chem Educ.* 39 (1962) 546.
- [39] Karcı F, Karcı F., Synthesis and Tautomeric Structures of Some Novel Thiophene-Based Bis-Heterocyclic Monoazo Dyes, *J Mol Struct.*, 1024 (2012) 117-122.
- [40] Çiçen G, Karabacak Atay Ç, Tilki T. Disazo Dyes Containing Pyrazole and Benzothiazole Moieties: Synthesis, Characterization, Absorption Characteristics and Tautomeric Structures, *Res Chem Intermed.*, 43 (2017), 6803-6816.
- [41] Omar AZ, El-Rahman MA, El-Sadany SK, Hamed EA, El-Atawy MA. Synthesis of Novel Bisazo Disperse Dyes: Spectroscopic Characterization, DFT Study and Dyeing of Polyester, *Dyes Pigm.*, 196 (2021), 109831.

DESIGN Third order Sinusoidal Oscillator Employing Current Differencing Cascaded Trans conductance Amplifiers

Arsen Ahmed MOHAMMED^{1*}  Hüseyin DEMİREL² 

¹ Kirkuk University, Engineering Faculty, Electrical Eng. Dep., KIRKUK, IRAQ

² Karabuk University, Engineering Faculty, Electrical-Electronics Eng. Dep., KARABUK, TURKIYE

Article Info

Research article
Received: 30/04/2023
Revision: 15/06/2023
Accepted: 21/06/2023

Keywords

CDCTA
Low oscillation frequency
45 nm gpdk
Cadence virtuoso

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2023
Düzeltilme: 15/06/2023
Kabul: 21/06/2023

Anahtar Kelimeler

CDCTA
Düşük osilatörü frekansı
45nm gpdk
Kadans virtüöz

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, create third order oscillator using active block chip (CDCTA) with only three passive capacitors in cadence virtuoso and compare the result with experiment on a breadboard. / Bu çalışmada, kadans virtüözünde sadece üç pasif kapasitörlü aktif bir blok yongası (CDCTA) kullanarak üçüncü dereceden bir osilatör oluşturun ve sonucu bir breadboard üzerinde bir deneyle karşılaştırın.

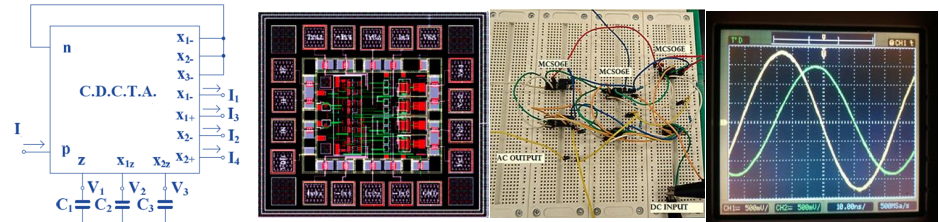


Figure A: An oscillator test breadboard and a proposed quadrature sinusoidal oscillator with experimental output waveforms / **Şekil A:** Bir osilatör test breadboard ve deneysel çıkış dalga formlarına sahip önerilen bir karesel sinüzoidal osilatör

Highlights (Önemli noktalar)

- A CDCTA active chip is created with three grounded passive capacitors. / Üç topraklanmış pasif kapasitör ile bir CDCTA aktif çip oluşturulur.
- Between two sinusoidal impulses, the oscillator under examination may offer a 90° phase difference. / İki sinüzoidal dürtü arasında, incelenen osilatör 90° faz farkı sunabilir.
- High impedance output current nodes were suited for cascading in a current-mode circuit without current buffers. / Yüksek empedanslı çıkış akımı düğümleri, akım tamponları olmayan bir akım modu devresinde basamaklama için uygundur.

Aim (Amaç): The aim of this study is to construct an active block of the CDCTA utilising the findings of an experiment on a breadboard and the 45 nm GPDK parameter data from Cadence Virtuoso. / Bu çalışmanın amacı, bir breadboard üzerindeki bir deneyin bulgularını ve Cadence Virtuoso'dan 45 nm GPDK parametre verilerini kullanarak CDCTA'nın aktif bir bloğunu oluşturmaktır.

Originality (Özgünlük): In this work, the result output was generated utilising a novel CMOS active block that used three passive capacitors and a cadence parameter of 45 nm with a chip called the MCSO6E oscillator. / Bu çalışmada, sonuç çıktısı, üç pasif kapasitör ve MCSO6E osilatörü adı verilen bir çip ile 45 nm'lik bir kadans parametresi kullanan yeni bir CMOS aktif blok kullanılarak üretildi.

Results (Bulgular): In this work, the theoretical calculation of the oscillation frequency $F_0=5.1$ MHz with low power supply voltage and the phase difference between dual-mode is 90° was performed using active block dual-mode (current and voltage) third-order. / Bu çalışmada, düşük güç kaynağı voltajı ile $F_0=5.1$ MHz salınım frekansının teorik olarak hesaplanması ve çift mod arasındaki faz farkı 90° olup aktif blok çift modlu (akım ve voltaj) üçüncü dereceden kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Conclusion (Sonuç): High stability, low sensitivity, and low power consumption. Considering the aforementioned benefits, the proposed sinusoidal sine oscillator can be utilised for sinusoidal signal sources in electronic measurements. / Yüksek stabilite, düşük hassasiyet ve düşük güç tüketimi. Yukarıda belirtilen faydalar göz önüne alındığında, önerilen sinüzoidal sinüs osilatörü, elektronik ölçümlerde sinüzoidal sinyal kaynakları için kullanılabilir.



DESIGN Third order Sinusoidal Oscillator Employing Current Differencing Cascaded Trans conductance Amplifiers

Arsen Ahmed MOHAMMED^{1*} Hüseyin DEMİREL²

¹ Kirkuk University, Engineering Faculty, Electrical Eng. Dep., KIRKUK, IRAQ

² Karabuk University, Engineering Faculty, Electrical-Electronics Eng. Dep., KARABUK, TURKIYE

Article Info

Research article
Received: 30/04/2023
Revision: 15/06/2023
Accepted: 21/06/2023

Keywords

CDCTA
Low oscillation frequency
45 nm gpdk
Cadence virtuoso

Abstract

In this study, the realization of a quadrature sinusoidal oscillator of third order was described. The Current Differencing Cascaded Transconductance Amplifier (CDCTA), a single active building block, was employed in this design in conjunction with three grounded passive capacitors. The suggested circuit's simple architecture provides it with a good candidate for inclusion in integrated circuits. The oscillator under examination may provide a 90° phase difference between two sinusoidal impulses. High impedance output current nodes made it possible to cascade them in a current-mode circuit without the need for current buffers since they were suitable for cascading. Moreover, the circuit only uses 1 mW of power, has a maximum sensitivity of 0.5, and oscillates at a frequency of up to 4.99 MHz. Additionally, both its oscillation frequency and condition may be electrically and independently adjusted. The theoretical analysis of the circuit was confirmed by the results of computer simulation using 45 nm gpdk cadence virtuoso program.

TASARIM Akım Farklılaştırıcı Basamaklı Trans iletkenlik Amplifikatörleri Kullanan Üçüncü dereceden Sinüzoidal Osilatör

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2023
Düzeltilme: 15/06/2023
Kabul: 21/06/2023

Anahtar Kelimeler

CDCTA
Düşük osilatör frekansı
45nm gpdk
Kadans virtüöz

Öz

Bu çalışmada, Üçüncü dereceden bir karesel sinüzoidal osilatörün gerçekleştirilmesi tanımlanmıştır. Akım Farklılığındaki Basamaklı Transiletkenlik Amplifikatörü (CDCTA), tek bir aktif yapı taşı, Bu tasarımda üç topraklanmış pasif kapasitör ile kullanıldı. Önerilen devrenin basit mimarisi, onu entegre devrelere dahil etmek için uygun bir aday olarak sağlar. İncelenen osilatör, iki sinüzoidal impuls arasında 90° faz farkı sağlayabilir. Yüksek empedanslı çıkış akımı düşümleri. Basamaklama için uygun olduklarından, akım tamponlarına ihtiyaç duymadan bir akım modu devresinde basamaklamayı mümkün kılmıştır. Ayrıca, devre sadece 1 mW güç kullanır, maksimum 0,5 hassasiyete sahiptir ve 4.99 MHz'e kadar bir frekansta salınır. Ek olarak, hem salınım frekansı hem de durumu elektriksel ve bağımsız olarak ayarlanabilir. Devrenin teorik Analizi 45 nm gpdk kadans virtüöz programı kullanılarak bilgisayar simülasyonu sonuçları ile doğrulandı.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Sinusoidal oscillators have broad application prospects in signal processing fields such as communication, instrumentation, and automation, based on operational trans conductors (OTA), second-generation current transmitters (Second Generation Current Transducers, CCII), and current differential buffer amplifiers (Current Differential Buffer Amplifiers (Current Differential Amplifiers) Sinusoidal oscillator circuits for various voltage-mode modules such as Differentiating Buffered Amplifiers, CDBA) have been reported [1-3]. As

the requirements of integrated circuits in terms of speed, band, power consumption, etc., voltage-mode active devices have seriously affected the application of sinusoidal oscillators in the fields of high speed and high frequency. In 2003, D. Biolek first proposed a current differential trans conduction amplifier for pure current mode active devices (1~3). Current Differencing Trans Conducting Amplifier, CDTA) Concept [4]

CDTA has current input and current output characteristics. Compared with CCII, OTA, and CDBA, it has a lower operating voltage and a wider

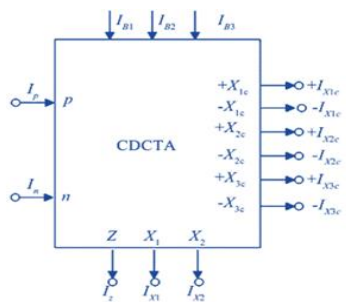
band, making up for many of the defects of previous voltage-mode active devices, and is ideal for integrated circuit design [5~10]. Current Differential Cascaded Transconductance Amplifiers (CDCTA) are the latest development of CDTA devices [11]. They combine the advantages of current differential trans conductors and computational trans conductors in terms of structure and performance. At the same time, because of their structure and performance The characteristics of the differential input structure and the fact that the internal circuit does not have a current-to-voltage conversion process make CDCTA have obvious advantages in simplifying the structure, reducing power consumption, broadening the band, and increasing reliability, especially in the oscillating circuit design based on CDCTA [12~15] This paper uses CDCTA and passive capacitors to design a low-power dual-mode (current and voltage) three-order oscillation integrated circuit.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The methods used cadence virtuoso (45 nm gpdk parameter) program to create the various CMOS active and filter to obtain desired signal.

2.1 CDCTA and Its CMOS Circuit (CDCTA ve CMOS Devresi)

CDCTA is a pure current mode active device with current input and current output. Its circuit symbol and equivalent circuit are shown in Figure 1. P is the positive current input terminal of CDCTA, n is the negative current input terminal, and Z, Xi, and ±Xic are the high impedance current output terminals. Its port voltammetry characteristics are:



$V_p=V_n=0, I_z=I_p-I_n$ (1)

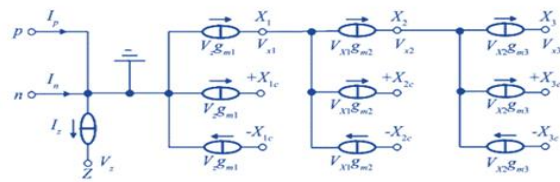
$\pm I_{x1c}=I_{x1}=g_{m1} \cdot V_z$ (2)

$\pm I_{x2c}=I_{x2}=g_{m2} \cdot V_{x1}$ (3)

$\pm I_{x3c}=I_{x3}=g_{m3} \cdot V_{x2}$ (4)

In the above equation, $V_p, V_n, V_z,$ and V_{xi} respectively indicate the voltage drop at the p, n, Z, and X_i ends of the CDCTA; $I_p, I_n, I_z, I_{xi},$ and I_{xic} respectively indicate the current flowing through the p, n, Z, $X_i,$ and X_{ic} ends; g_{mi} is the transconductance gain and can be adjusted by the

external bias current I_{Bi} . By the formula (1) ~ (4) As can be seen, the voltage drop at the input end of CDCTA is constant to zero, and there is no voltage drop at the p and n ends. The input end of the current differential cascade transconductor amplifier uses this structure, so that it can obtain very low input impedance and a fairly wide band in some functional application circuits. As shown in Figure 2, the entire circuit consists of two parts: a current differential circuit and a multi-output transconductance amplification circuit [11]. The input stage achieves differential current input function and zero input characteristics through two sets of negative feedback current mirrors composed of CMOS tubes M_1 to M_{15} ; the output stage achieves multiple output transconductance amplification functions and high output impedance characteristics through a multi-level cross-coupling transconductor circuit composed of CMOS tubes M_{16} to M_{17} and an offset current source I_{Bi} . Furthermore, the transconductivity gain G_{MI} value is related to the external bias current I_{Bi} as shown in Equation (5), K is The fixed coefficient of the CMOS tube. All CMOS tubes M_p are equivalent to a stable offset current source. All CMOS tubes use the same DC power supply to ensure that the entire circuit works in a normal working state.



$g_m = \sqrt{KI_{Bn}}$ (5)

Figure 1. Electrical symbol & Equivalent circuit of CDCTA (CDCTA'nın elektrik sembolü ve eşdeğer devresi)

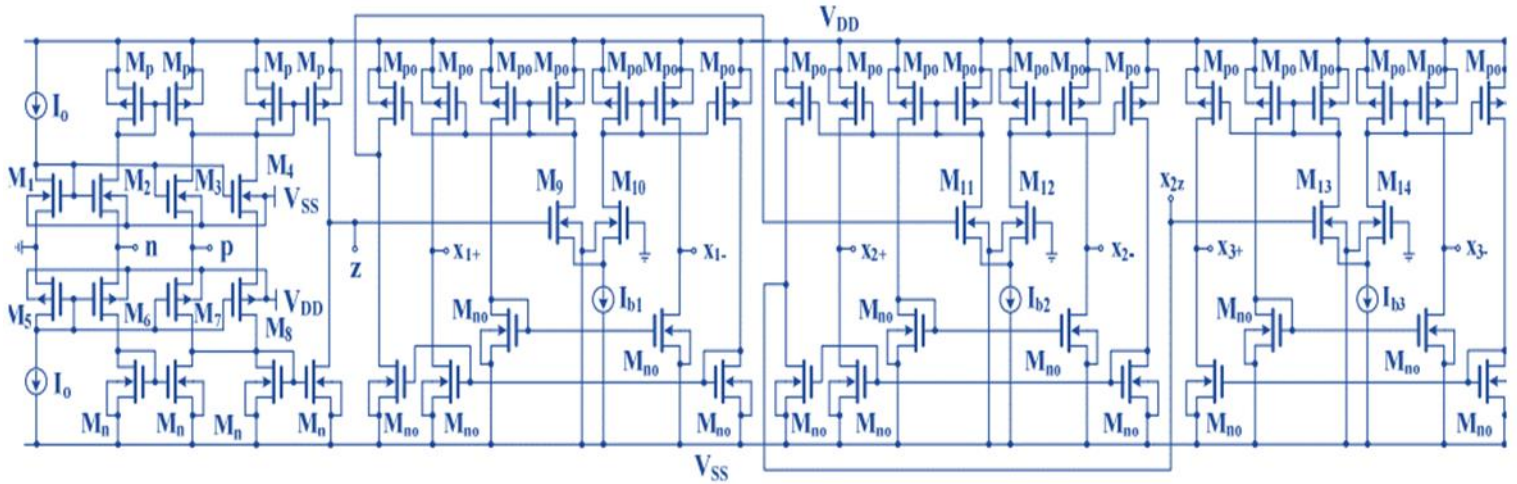


Figure 2. Implementation of CDCTA using CMOS transistor (CMOS transistör kullanarak CDCTA uygulaması)

2.2 Design of a 3rd Order Oscillator (3. Dereceden Bir Osilatör Tasarımı)

Figure 3 shows a third-order sinusoidal oscillator circuit based on CDCTA. It uses only a single CDCTA and three ground capacitors to achieve two sets of sinusoidal current signals (I_{o1}, I_{o2} and -I_{o1}, -I_{o2}) and a set of sinusoidal voltage signals (V₁, V₂ and V₃). Combining Figure 3 with Equations (1) to (4) for conventional circuit analysis, the circuit output

equations are as follows:

$$I_{o1} = I_{x2c} = g_{m2} V_{x1} = g_{m2} (I_{x1} / sC_2) \tag{6}$$

$$I_{x1} = g_{m1} * V_z = g_{m1} (I_z / sC_1) \tag{7}$$

$$I_z = I_p - I_n = -I_{x1c} - I_{x2c} - I_{x3c} \tag{8}$$

$$I_{o1} (s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m1}) + g_{m1} * g_{m2} (I_{o1} + I_{o2}) = 0 \tag{9}$$

$$s^3 C_1 C_2 C_3 + s^2 C_2 C_3 g_{m1} + s C_3 g_{m1} g_{m2} + g_{m1} g_{m2} g_{m3} = 0 \tag{10}$$

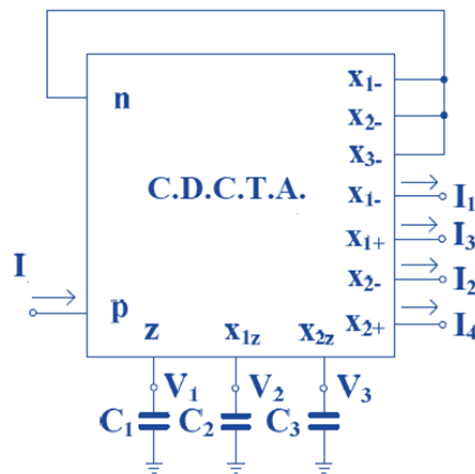


Figure 3. Proposed 3rd Order Using CDCTA (CDCTA kullanılarak önerilen üçüncü derecede)

Equation (10) shows that a sinusoidal oscillator based on CDCTA has a stable closed-loop gain, as shown below:

$$AF = \frac{(s^3 C_1 C_2 C_3 + s^2 C_2 C_3 g_{m1} + s C_3 g_{m1} g_{m2})}{(g_{m1} g_{m2} g_{m3})} = -1 \tag{11}$$

According to conventional circuit analysis methods, a sinusoidal oscillating circuit should meet the following conditions for stable oscillation It can be seen from the equation (11).

$$A(\omega) = \frac{1}{(gm_1 gm_2 gm_3)} = 1 \tag{12}$$

$$F(\omega) = \{ (j\omega)^3 C_1 C_2 C_3 + (j\omega)^2 C_2 C_3 gm_1 + (j\omega) C_3 gm_1 gm_2 - \omega^2 C_2 C_3 gm_1 + j(\omega C_3 gm_1 gm_2 - \omega^3 C_1 C_2 C_3) \} \tag{13}$$

It can be seen from equations (12) and (13) that the proposed oscillator basically amplifies the large circuit gain A and the feedback circuit gain F, and the difference between the proposed oscillator is as follows:

$$|F(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(-\omega^2 C_2 C_3 gm_1)^2 + (\omega C_3 gm_1 gm_2 - \omega^3 C_1 C_2 C_3)^2}} \tag{14}$$

Thus, when $n = 1$ is taken for the combined equation (12) and equation (14) analysis, we have:

$$|A(\omega)| |F(\omega)| = \frac{\omega^2 C_2 C_3 gm_1}{gm_1 gm_2 gm_3} = 1 \tag{15}$$

Using Equation (5) and substituting Equation (15) analysis respectively, it can be obtained that the oscillation conditions and oscillation frequency of the proposed sinusoidal oscillator are classified as follows:

$$\frac{gm_3}{gm_1} = \frac{\sqrt{I_{B3}}}{\sqrt{I_{B1}}} = \frac{C_3}{C_1} \tag{16}$$

$$W = K * \sqrt{\frac{gm_1 * gm_2}{C_1 * C_2}} = \sqrt{\frac{I_{B1} * I_{B2}}{C_1 * C_2}} \tag{17}$$

As can be seen from equations (16) and (17), the oscillation condition and oscillation frequency of the CDCTA are related to the transconductive g_{mi} of CDCTA, so the oscillation condition and oscillation frequency of the circuit can be changed by adjusting the external bias current i_{Bi} . Further more, when other parameters are kept unchanged, the oscillation conditions of the circuit can be changed without changing the oscillation frequency; similarly, when only gm_2 is electronically regulated, the oscillation frequency of the circuit can be changed. Oscillation conditions are not affected. Therefore, the oscillation conditions and oscillation frequency of this third-order sinusoidal oscillator can be

electronically controlled and tuned independently of each other. Further analysis of the output current and voltage transmission characteristics of the

proposed circuit results in the following relationships:

$$I_{o1}(s)/I_{o2}(s) = sC_3/gm_3 \tag{18}$$

$$V_{o1}(s)/V_{o2}(s) = sC_3/gm_2 \tag{19}$$

Obviously, equations (18) and (19) show that the phase difference between I_{o1} and I_{o2} is 90° , and the phase difference between V_{o1} and V_{o2} is 90° . Therefore, the proposed circuit can simultaneously achieve sinusoidal current signals and sinusoidal voltage signals in the same Circuit. Furthermore, assuming that CDCTA has the same trans conductivity parameters and uses the same passive capacitor, that is,

$gm_1 = gm_2 = gm_3 = g_m, C_1 = C_2 = C_3 = C$, further analysis of transmission. The amplitude characteristics of the output signal can be obtained:

$$\left| \frac{I_{o1}(j\omega)}{I_{o2}(j\omega)} \right| = \frac{C_3}{gm_3} \sqrt{\frac{gm_1 gm_2}{C_1 C_2}} = \frac{C}{g} \sqrt{\frac{g^2}{C^2}} = 1 \tag{20}$$

$$\left| \frac{V_{o1}(j\omega)}{V_{o2}(j\omega)} \right| = \frac{C_3}{gm_3} \sqrt{\frac{gm_1 gm_2}{C_1 C_2}} = \frac{C}{g} \sqrt{\frac{g^2}{C^2}} = 1 \tag{21}$$

It can be seen that the two sets of sinusoidal current signals of the proposed nth-order sinusoidal oscillator have the same amplitude characteristics as a set of sinusoidal voltage signals. Furthermore, it can also be seen from the above equation that the amplitude of the output signal of the sinusoidal oscillator can also be adjusted by changing the size of the external bias current I_{Bn} according to actual application conditions.

2.3 Sensitivity Analysis (Hassasiyet Analizi)

Since the proposed circuit is affected by the non-ideal characteristics of the active device, there will be a certain deviation from the ideal value in actual application. Therefore, for a complete circuit analysis, it is necessary to further analyze and explore the non-ideal characteristics of the circuit. Assume that α_p ($\alpha_p = 1 -$

$\epsilon_p, |\epsilon_p| < 1$) and α_n ($\alpha_n = 1 - \epsilon_n, |\epsilon_n| < 1$) are the biological transmissions of CDCTA from p and n end to Z end, respectively Current transfer gain, β ($\beta = 1 - \epsilon_b, |\epsilon_b| < 1$) is the output trans conduction error of z, xi to x1, x (i+1) end, and gamma ($\gamma = 1 - \epsilon_c, |\epsilon_c| < 1$) is the xi end Since in a non-ideal situation, the values of the parameters $\alpha, \beta,$ and

gamma are infinitely close to 1 but not equal to 1, the parasitic conductors Gz, Gz1, and Gx2 are infinitely close to 0 but not equal to 0, and C'1, C'2, C3. As can be seen from equation (26), the oscillation frequency of the proposed sinusoidal oscillator is small compared to the theoretical value. Therefore, in order to make up for the non-ideal characteristics of the oscillation frequency Effects, gm1 and gm2 values should be adjusted to compensate in the actual circuit. According Parasitic current transmission gain to the XIC end. Furthermore, under non-ideal circumstances, there are parasitic impedance Rp and Rn at the p and n ends, and there are also ground parasitic resistors Rz, Rxi, Rxic, and parasitic capacitors Cz, Cxi, and Cxic at the Z, Xi, and Xic terminals respectively. When the oscillator frequency is less than 1/ (Cxc * Rn) or 1/ (Cxi * Rp), a non-ideal CDCTA circuit is used to recreate the proposed third-order sinusoidal oscillator The analysis is as follows:

$$I_z = \alpha_p \cdot I_p - \alpha_n \cdot I_n \tag{22}$$

$$I_{x1} = \beta_1 g_{m1} V_z \tag{23}$$

$$I_{xi} = \beta_n g_{mi} V_{x(n-1)} \quad (i=2,3) \tag{24}$$

$$I_{xi} = \gamma_n I_{xi} \quad (n=1,2,3) \tag{25}$$

Combine Figure 3 with the above equation to recalculate the characteristic equations of a third-order sinusoidal oscillator under non-ideal conditions:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(G_z \cdot G_{x2} \cdot C'2 + G_{x1} \cdot G_{x2} \cdot C'1 + G_z \cdot G_{x1} \cdot C'3 + \beta_1 \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \alpha_p g_{m1} (G_z \cdot G_{x1} \cdot C'3 + G_z \cdot G_{x2} \cdot C'2 + \beta_2 \cdot g_{m2} \cdot G_z \cdot G_{x1} \cdot C'3))}{C_1 C_2 C_3}} \tag{26}$$

The values are very low, and their absolute values are not greater than 0.5. As a result, the proposed circuit has a high degree of stability. to the sensitivity formula $S_y^x = (x/y) \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$, the active and passive sensitivity values of an sinusoidal oscillator can be obtained by equation (26)

$$S_{\beta_1, \beta_2, \alpha_p, \gamma_1, \gamma_2}^{\omega_0} = 0.499 \quad , \quad S_{C_1, C_2, C_3}^{\omega_0} = 0.499$$

$$S_{g_{m1}, g_{m2}}^{\omega_0} = 0.499 \quad S_{\beta_3, \alpha_3, \gamma_3, g_{m3}}^{\omega_0} = 0 \tag{27}$$

As can be seen from equation (27), the oscillator is passive and active sensitive. Table 1 contrasts the performance of the proposed CDCTA with the main results of the cited [15] CDCTA. In terms of voltage of supply, input spectrum, bandwidth, and consumption of power, Table 1 shows that the recommended circuit outperforms the CDCTA while keeping acceptable both its input and output impedance characteristics. It is also clear that the recommended circuit consumes 1 mW of power. The test bread board for the MCS06E oscillator is shown in Figure 8, together with the results of the measured experiments. The average OF approximates 321.1 kHz,

Table 1. Compares of the reference [15] CDCTA with the proposed CDCTA's performance

(Tablo 1. Referans [15] CDCTA'nın önerilen CDCTA'nın performansı ile karşılaştırılması)

Performances	[15]	This work
Process	0.5 μm	45 nm
Adjustable feature for tranconductance (mS).	0.8–138	130–20
Voltage of supply (V)	1.25 V	0.9 V
Consumption of power	2.48 mW	1 mW
Input spectrum (GHz)	0.95, 0.95, 0.93	0.049
Input and output impedance characteristics (V)	7.03, 15.18	22
Technology programs	Ltspice	Cadence virtuoso

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In order to verify the accuracy of the above theoretical analysis, CADENCE virtuoso 45 nm gpdk simulations were performed on the proposed dual-mode (current and voltage) third-order sinusoidal oscillator. The simulation process model used the TSMC 45 nm CMOS process and the W/L width-to-length ratio settings for the CMOS tube are shown in Table 2. The power supply voltage $V_{DD} = -V_{SS} = 0.9\text{ V}$, $I_0 = 25\mu\text{A}$. The offset current and passive capacitance values are respectively $I_{B1} = 58\ \mu\text{A}$, $I_{B2} = 59\ \mu\text{A}$, $I_{B3} = 57\ \mu\text{A}$, $C_1 = C_2 = C_3 = 12\ \text{pF}$, the theoretical calculation of the oscillation frequency $F_0=5.1\ \text{MHz}$. The output sinusoidal current and voltage signal simulations results are shown in Figure 4 and Figure 5, respectively. Actual spectrum of current outputs of the oscillator measurements in Figure 6.

The phase difference between I_{o1} and I_{o2} is 90° , the phase difference between V_{o1} and V_{o2} is 90° , the simulation results are in line with theoretical derivation. Furthermore, the power consumption of the third-order sinusoidal oscillator circuit was measured to be $1\ \text{mW}$. In order to meet actual application requirements, the proposed circuit was implemented using a $45\ \text{nm CMOS}$ process flow sheet. The micrograph of the chip is shown in Figure 7. The total area of the chip is only about $03\times 03\text{mm}^2$ shown below is an image of the output sinusoidal voltage signal measured at the end points of the V_{o1} and V_{o2} chips, and the measured phase difference is 90.00° . The simulation and experimental results show the proposed 3rd order shown in Figure 8 with output signal. The oscillator circuit is correct and effective, and has practical application significance.

Table 2. CMOS tube parameters (CMOS tüp parametreleri)

COMSTRANSISTORS	W(µm)/L(µm)
M1, M2, M3, M4, Mn	25/1
M5, M6, M6, M8, Mp	1/1
M9, M10	50/1
Mop	70/0.9
Mon	25/0.9

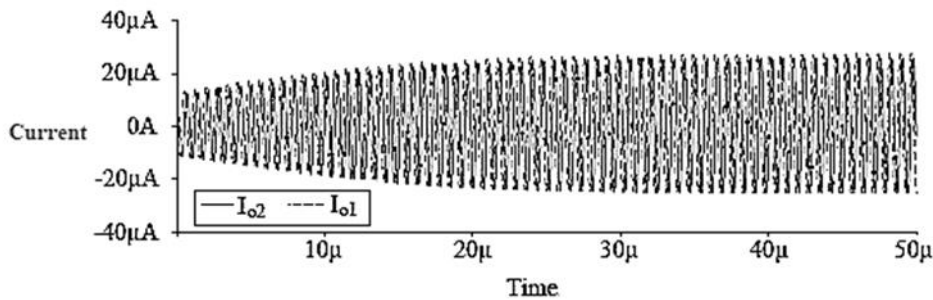


Figure 4. Current outputs of the proposed oscillator (Önerilen osilatörün akım çıkışları)

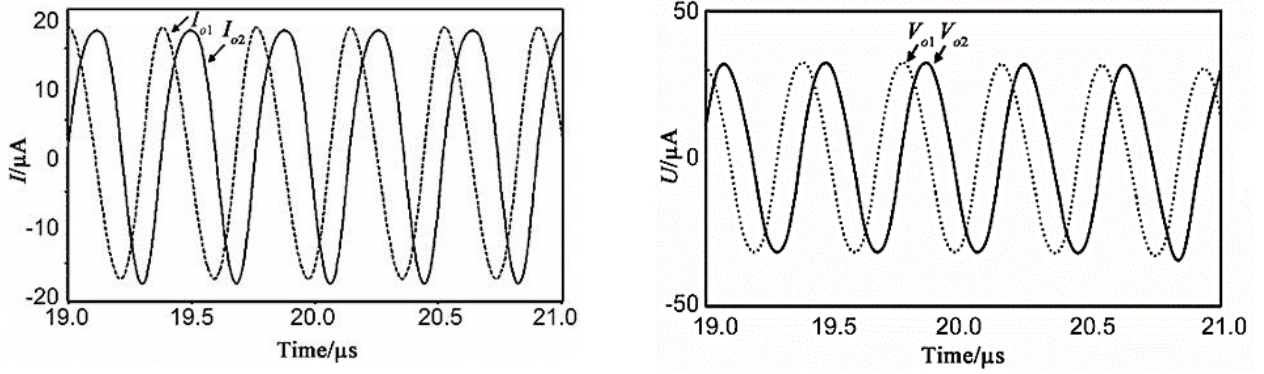


Figure 5. Dual-mode (Current and voltage) outputs of the proposed oscillator (Önerilen osilatörün çift modlu (Akım ve voltaj) çıkışları)

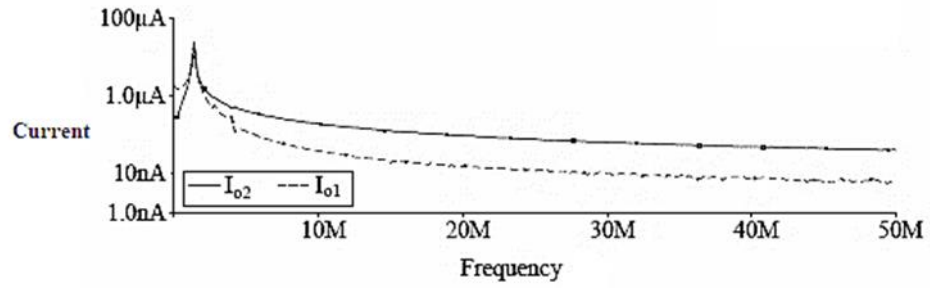


Figure 6. Spectrum of current outputs of the oscillator (Osilatörün akım çıkışlarının spektrumu)

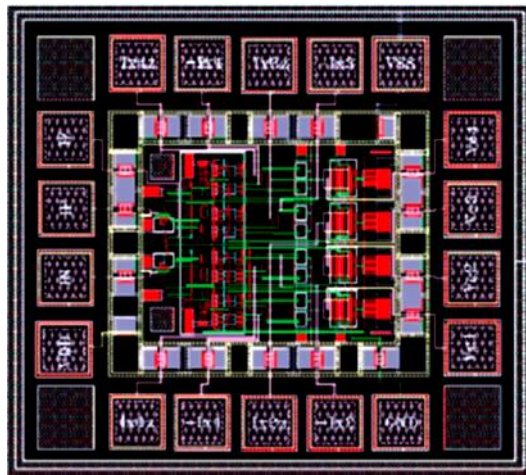


Figure 7. Layout of the Active filter (CDCTA) (Aktif filtrenin düzeni (CDCTA))

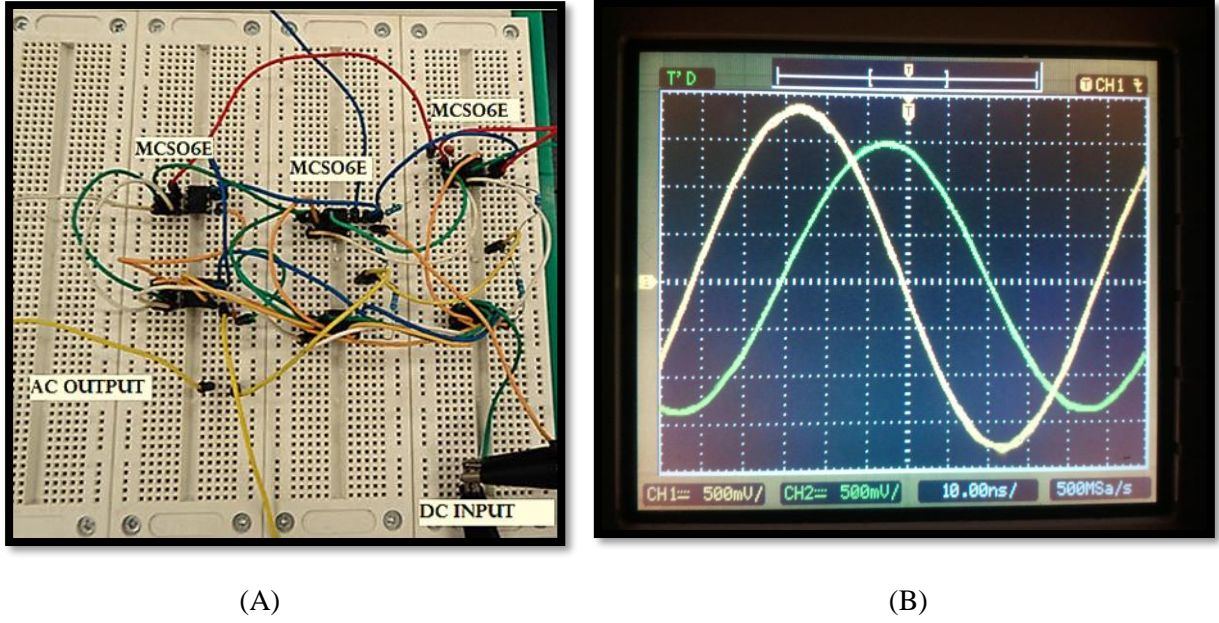


Figure 8. Experimentally, the oscillator response was determined. **A** and **B** are the experimental output waveforms and the oscillator test breadboard (Deneysel olarak osilatör yanıtı belirlendi. **A** ve **B** deneysel çıkış dalga formları ve osilatör test devre tahtasıdır)

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

Suggest a dual-mode (current and voltage) analog integrated third-order sinusoidal oscillator circuit. The proposed circuit has the following characteristics: (1) there are few active and passive components and the structure is simple; (2) there are no resistors, all capacitors are connected, and are easy to integrate; (3) It is versatile and can generate sinusoidal current and sinusoidal voltage signals at the same time; (4) The oscillation frequency is high, making it easy to apply in the high frequency field ; (5) The oscillation frequency and oscillation conditions can interact with each other Independent electronic control and regulation, flexible application; (6) Low power consumption, low sensitivity, and high stability. Based on the above advantages, the proposed sinusoidal sine oscillator can be used for sinusoidal signal sources in electronic measurements, carrier signals in wireless transmitters, clock signal sources in digital systems, and everything else requiring sinusoidal current signals. the results of the active filter simulation using 45 nm gpdk cadence virtuoso program.

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)

Arsen Ahmed MOHAMMED: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

Hüseyin DEMİREL: 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. Haykin, M. Moher, An introduction to analog and digital communications, John Wiley & Sons, New York, 2007.
www.wiley.com/college/wileyplus

- [2] W. Bolton, Measurement and instrumentation systems, Newnes, Oxford, 1996, www.Measurement-Instrumentation-Systems-W-Bolton/dp/0750631147
- [3] P. Prommee, K. Dejhan, "An integrable electronic-controlled quadrature sinusoidal oscillator using CMOS operational transconductance amplifier," International Journal of Electronics, vol. 89, pp. 365-379, 2002. DOI: [10.1080/713810385](https://doi.org/10.1080/713810385)
- [4] M. Kumngern, S. Junnapiya, "Current-mode third-order quadrature oscillator using minimum elements," in Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Indonesia, 2011, pp. 1-4. DOI: [10.1109/ICEEI.2011.6021799](https://doi.org/10.1109/ICEEI.2011.6021799)
- [5] S. Maheshwari, I. A. Khan, "Current controlled third order quadrature oscillator," IEE proceedings, Circuit, Devices and Systems, vol. 152, pp. 605-607, 2005. DOI: [10.1049/ip-cds:20045185](https://doi.org/10.1049/ip-cds:20045185)
- [6] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, W.-Y. Chung, H.-I. Tang, Y.-I. Wen, "Quadrature oscillator using CCIs," International Journal of Electronics, vol. 92, pp. 21-31, 2005. <https://doi.org/10.1080/00207210412331332899>
- [7] S. Maheshwari, "Current-mode third-order quadrature oscillator," IET Circuits, Devices and Systems, vol. 4, pp. 188-195, 2010. DOI: [10.1049/iet-cds.2009.0259](https://doi.org/10.1049/iet-cds.2009.0259)
- [8] J.-W. Horng, "Current/voltage-mode third order quadrature oscillator employing two multiple outputs CCIs and grounded capacitors," Indian Journal of Pure & Applied Physics, vol. 49, pp. 494-498, 2011. <http://nopr.niscares.in/handle/123456789/12012>
- [9] P. Uttaphut, "New current-mode multiphase sinusoidal oscillators based on CCCCTA-based lossy integrators," Electr. Rev., pp. 291_5, Jan. 2012. <http://pe.org.pl/articles/2012/1a/60.pdf>
- [10] W. Jaikla, and P. Prommee, "Electronically tunable currentmode multiphase sinusoidal oscillator employing CCCDTAbase all-pass filters with only grounded passive elements," Radioengineering, Vol. 20, no. 3, pp. 594_9, Sep. 2011. <http://hdl.handle.net/11012/56884>
- [11] J. Xu, C. Wang, J. Jin, "Current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA) and its applications on current-mode n th-order filters," Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 32, pp. 2047–2063, 2013. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00034-013-9565-8>
- [12] E. Tlelo-Cuautle, L. Gerardo de la Fraga, K. Phanrattanachai, K. Pitaksuttayaprot, "CDCTA and OTA realizations of a multi-phase sinusoidal oscillator," IETE Technical Review, vol. 32, pp. 497-504, 2015. <https://doi.org/10.1080/02564602.2015.1043149>
- [13] Ahmed, A. and Demirel, H., 2021. FPAA based on Floating Current Source Analog system design. *Design Engineering*, pp.10953-10969. <http://thedesigengineering.com/index.php/DE/article/view/6155>
- [14] Mohammed, Arsen Ahmed, Zaidoon Khalaf Mahmood, and Hüseyin Demirel. "STUDY OF FINFET TRANSISTOR: CRITICAL AND LITERATURE REVIEW IN FINFET TRANSISTOR IN THE ACTIVE FILTER." 3C TIC 12.1 (2023): 65-81. <https://doi.org/10.17993/3ctic.2023.121.65-81>
- [15] Dr.HUSEYIN DEMIREL & ARSEN AHMED MOHAMMED, Essentials of Digital Electronics, Baghdad, 2023. <https://www.isbniraq.org/?product=essentials-of-digital-electronics>
- [16]. J. Vavra, and J. Bajer, "Current-mode multiphase sinusoidal oscillator based on current differencing units," Analog Integr. Circuits Signal Process., Vol. 74, no. 1, pp. 121_8, Jan. 2013. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10470-012-9906-8>

Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Gizem HATIPOĞLU¹  Hüseyin ÜNAL²  Salih Hakan YETGİN^{3*} 

¹Power Co SE, Industriestraße Nord 38239, Salzgitter, Germany

²Sakarya University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey

³Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/04/2023
Düzeltilme: 01/08/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Poli-fital-amid
Karbon fiber
Aşınma
Sürtünme

Article Info

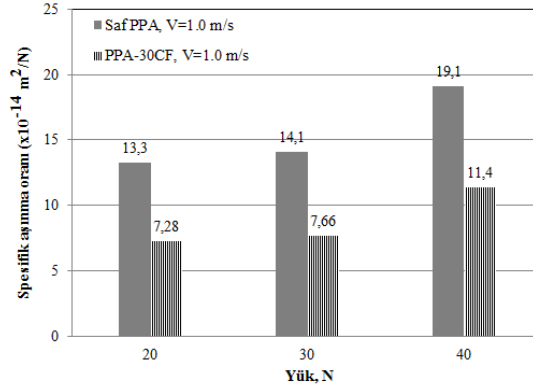
Research article
Received: 27/04/2023
Revision: 01/08/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Polyphthalamide
Carbon fiber
Wear
Friction

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada kuru kayma şartları altındaki poli-fital-amit (PPA) ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin (PPA-30CF) 0.5 ve 1.0 m/s kayma hızlarında ve 20,30,40N yükler altında kuru kayma şartlarındaki tribolojik özellikleri araştırılmıştır. / In this study, tribological properties of polyphthalamide (PPA) and 30% carbon fiber reinforced PPA composite (PPA-30CF) were investigated under dry sliding conditions at 0.5 and 1.0 m/s sliding speeds and 20,30,40N loads.



Şekil A: Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi / **Figure A:** The variation of the specific wear rate of pure PPA polymer and PPA-30CF composite with applied load

Önemli noktalar (Highlights)

Saf PPA polimerine %30 oranında karbon elyaf ilavesi, kompozitin aşınma oranının önemli oranda azalmasını sağlar. Saf PPA polimerine %30 oranında karbon elyaf ilavesi, kompozitin mukavemetinin önemli oranda artmasını sağlar. Bu da yüksek yükler altında aşınmaya maruz kalan ortamlarda çalışma imkanı sağlar. / Adding 30wt.% carbon fiber to the pure PPA polymer significantly reduces the wear rate of the composite. The addition of 30wt.% carbon fiber to the pure PPA polymer significantly increases the strength of the composite. This enables operation under high loads in environments subject to friction and wear.

Amaç (Aim): Bu çalışma kuru kayma şartları altındaki poli-fital-amit ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin tribolojik özelliklerini araştırmıştır. / This study investigated the tribological properties of polyphthalamide (PPA) and 30wt.% carbon fiber reinforced PPA composites under dry sliding conditions.

Özgünlük (Originality): PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitinin endüstride tribolojik uygulamalarda döküm poliamit (PA), poli-oksi-metilen (POM), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve Politetraflor etilen (PTFE) gibi geleneksel malzemelere alternatif yüksek performanslı polimer malzemelerin kullanılması. / PPA-30CF composite with PPA polymer is a high performance polymer material alternative to traditional materials such as cast polyamide (CPA), poly-oxy-methylene (POM), high density polyethylene (HDPE) and polytetrafluorethylene (PTFE) in tribological applications in industry.

Bulgular (Results): PPA/30CF kompoziti endüstride dişli çark gibi makine elemanı imalatında kullanıldığında saf PPA ya göre dişli ömrü yaklaşık %78 oranında artmıştır. / When the PPA/30CF composite is used in industry for the manufacture of machine elements such as gears, the gear life is increased by about 78% compared to pure PPA polymer.

Sonuç (Conclusion): PPA-30CF kompozitin aşınma oranı saf PPA polimerine göre yaklaşık %78 oranında daha düşük elde edilmiştir. / The wear rate of the PPA-30CF composite was approximately 78% lower than that of the pure PPA polymer.



Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Gizem HATIPOĞLU¹ Hüseyin ÜNAL² Salih Hakan YETGİN^{3*}

¹Power Co SE, Industriestraße Nord 38239, Salzgitter, Germany

²Sakarya University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey

³Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/04/2023
Düzeltilme: 01/08/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Poli-fital-amid
Karbon fiber
Aşınma
Sürtünme

Öz

Endüstrinin birçok alanında üretim makinalarında hareket iletiminde polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerden imal edilmiş dişliler kullanılmaktadır. Uygun malzeme çiftlerinin seçimi dişli malzemelerinin çalışma ömrünü belirlemektedir. Yüksek performanslı poli-fital-amit (PPA) polimer ve PPA kompozitlerin kullanımıyla makine elemanlarının ömrü artacaktır. Bu çalışmada, katkısız poli-fital-amit polimeri ile ağırlık olarak %30 oranında karbon fiber takviyeli poli-fital-amit (PPA-30CF) kompozitinin tribolojik performansları incelenmiştir. Aşınma deneyleri çelik diske karşı kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber takviyeli PPA kompoziti ikiz vidalı endüstriyel bir ekstruderde granül olarak üretilmiş ardından enjeksiyon makinasında aşınma test numuneleri basılmıştır. Aşınma testleri 20 N, 30 N ve 40 N yükler altında ve 0.5 ile 1.0 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, karbon fiber takviyeli PPA polimer kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı katkısız PPA polimerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısı artarken kayma hızının artırılması ile sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Aşınma oranı ise uygulanan yük ve kayma hızının artması ile artmıştır. Uygulanan aşınma ve sürtünme test çalışma şartlarında %30 oranında karbon fiber takviyeli poli-fital-amit kompozitin, katkısız PPA polimerine göre yaklaşık %78 oranında daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, makine elemanı olarak kullanılan dişlilerin çalışma ömrünün doğru malzeme kullanımı ile artırılabilceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Investigation of the Effect of Carbon Fiber Reinforced on the Tribological Properties of Poly-phthalate-amide (PPA) Polymer

Article Info

Research article
Received: 27/04/2023
Revision: 01/08/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Polyphthalamide
Carbon fiber
Wear
Friction

Abstract

In many areas of the industry, gears made of polymer and polymer-based composite materials are used to transmit motion in production machines. The selection of suitable material pairs determines the working life of the gear materials. Using high performance polyphthalateamide (PPA) polymers and PPA composites will increase the lifetime of machine elements. In this study, the tribological performances of polyphthalateamide polymer and 30 wt% carbon fiber reinforced polyphthalateamide composite (PPA-30CF) were investigated. Wear tests were carried out against a steel disc under dry ambient conditions. Carbon fiber reinforced PPA composite was produced as granules in a twin screw extruder, then wear test specimens were moulded in an injection moulding machine. The wear tests were carried out under loads of 20-40 N and sliding speeds of 0.5-1.0 m/s. The tests were carried out under dry ambient conditions and at room temperature using a pin-on-disc wear tester. As a result of the tests, it was determined that friction coefficient and wear rate of the PPA-30CF composite were lower than the PPA polymer. While the coefficient of friction increased with increasing the load, the coefficient of friction values decreased with increasing the sliding speed. The wear rate increased with increasing applied load and sliding speed. In the applied wear and friction test operating conditions, PPA-30CF composite was found to be approximately 78% more resistant than the PPA polymer. As a result, it was concluded that the working life of the gears used as machine elements can be increased by using the right material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerler ve polimer esaslı kompozitler, geleneksel malzemelere göre daha hafif olmaları, korozyona karşı dirençli olmaları ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlamaları nedeniyle otomotiv, makine, sağlık, elektrik/elektronik, havacılık/uzay, gıda ve petrol endüstrisi gibi farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak polimer malzemelerin tekrarlı yükler altında düşük ömür, düşük mekanik, termal ve tribolojik özellik göstermelerinden dolayı endüstride kullanım alanları sınırlanmaktadır. Bu yüzden endüstride kullanım alanlarını artırmak, mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için polimerlere talk, kalsit, kaolin, cam bilya, molibden disülfid, Vaks gibi dolgu/katkı malzemeleri ile cam fiber, karbon fiber ve aramit fiber gibi mukavemet artırıcı katkıları ilave edilmektedir. Cam fiberler, polimer kompozitlere düşük maliyet, yüksek çekme dayanımı, yüksek rijitlik, mükemmel korozyon direnci, iyi boyutsal kararlılık ve iyi yalıtım özellikleri sağlarken [1-5] karbon fiberler (CF) ise, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, elastiklik modülü, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik özelliği sağlamaktadır [5-7].

Cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozitler, düşük sürtünme katsayısı özellikleri ile tribolojik amaçlar için yaygın kullanılmaktadır [5]. Tablo 1'de gösterildiği gibi literatürde çok sayıda araştırmacı farklı polimerler üzerinde tribolojik deneyler gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmalarda, malzeme özellikleri, karşı disk malzeme çeşidi, katkı türü ve % katkı oranı, uygulanan yük, kayma hızı, sıcaklık ve ortam şartları (kuru/sulu) gibi parametreler incelenmiştir [5, 7-11]. Bu araştırmacılardan bazıları [5, 7-14] farklı polimer matrisler üzerinde çalışmışlar ve karbon elyafların mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda genel olarak karbon fiberlerin kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranını belirgin oranda azalttığını tespit etmişlerdir. Bazı çalışmalarda ise polimer esaslı kompozitlerin farklı ortam şartları altındaki tribolojik özellikleri incelenmiştir [6, 15-17]. Bu çalışmalarda genellikle kuru ve sulu ortam şartları karşılaştırılmıştır. Golchin ve arkadaşları [15] CF/grafit /çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı PPS kompozitlerin sulu ortam şartlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kısa karbon fiberler, PPS polimer kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranını önemli oranda azalttığı belirtilmiştir. Chukov ve arkadaşları [6] farklı oranlarda CF takviyeli çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) kompozitlerin sulu ortam şartları

altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, katkısız ÇYMAPE polimerine göre ÇYMAPE/12CF kompozitin sürtünme katsayısının sulu ortam şartlarında daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF ilavesi ile aşınma oranı azalmıştır. Zhang ve arkadaşları [16] kısa karbon fiber takviyeli poli-eter-imit (PEI) kompozitlerin sulu ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kısa CF/PEI kompozitler sulu ortam şartlarında daha düşük sürtünme özellikleri göstermiştir. Ancak, kuru ve sulu ortam şartları altında aşınma direncinde pek farklılık gözlenmemiştir. Huimin ve arkadaşları [17] kısa CF/PTFE/poli-imit (PI) ve aramit/PTFE/ PI kompozitlerin tribolojik özelliklerini kuru ve sulu ortam şartları altında incelemişlerdir. Kuru kayma şartları altında, kısa CF/PI kompozitin sürtünme ve aşınma özellikleri aramit/PI kompozitine göre daha yüksek elde edilmiştir. Aramit katkının kuru ortam şartlarında tribolojik özellikleri kısa karbon fibere göre geliştirdiği ancak sulu ortam şartlarında ise kötüleştirdiği belirtilmiştir.

Polimer çalışma sıcaklığı da, malzemelerin tribolojik özelliklerini etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Temas noktasında oluşan ısı ve deney süresince sıcaklık artışı ile polimer malzemeler deforme olmakta ve tribolojik özellikleri değişmektedir. Katkı çeşidi ve artan çalışma sıcaklığı kompozit malzemelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayılarını etkilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda araştırmacılardan bazıları [18] poliimid polimerinin farklı sıcaklıklardaki (23, 100, 180 ve 280 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında PI polimerinin artan sıcaklıklarda sürtünme ve aşınma dirençlerinin geliştiği belirtilmiştir. Chang ve arkadaşları [19] kısa CF, grafit, TiO₂ ve ZnS partikül katkılı poli-eter-eter-eton (PEEK) ve poli-eter-imit (PEI) kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki (23, 70, 120 ve 150 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. CF ve grafit katkıların kompozitlerin hem aşınma direncini hem de yük taşıma kapasitesini artırdığı belirtilirken sıcaklığın aşınma direncini azalttığı da belirtilmiştir. Zhong ve arkadaşları [20] karbon fiber takviyeli yüksek yoğunluklu poli-etilen (YYPE) kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki (20-40-60 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, KCF/YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı katkısız YYPE polimerine göre önemli oranda azalmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak, KCF ilavesi ile YYPE kompozitlerin aşınma direnci artmıştır. Singh ve arkadaşları [21] grafen kaplı CF/ epoksi kompozitlerin farklı yüklerde, farklı kayma frekanslarında ve farklı ortam sıcaklıklarındaki

tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, grafen kaplı fiberler kompozitin aşınma direncinin iyileşmesine katkı sağladığı ifade edilmiştir. Kayma frekansı ve sıcaklık arttıkça da, kompozitin sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Cui ve arkadaşları [22] karbon fiber/MoS₂/grafit/grafen/SiO₂ katkılı PEEK/PTFE kompozitlerin tribolojik özelliklerini oda sıcaklığında ve vakum altında incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, hem oda sıcaklığında hem de vakum altında (20 ile -100 °C sıcaklık arasında) sürtünme katsayısı 0.1 değerinin altında elde edilmiştir. PEEK/PTFE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Literatürde bazı çalışmalarda [23-28] uygulanan yükün, kayma hızının tribolojik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışmaların bazılarında [23-27] malzemeye göre değişmekle birlikte uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığı bazılarında [28] ise azaldığı belirtilmiştir. Uygulanan hızın artması ile azaldığı belirtilmiştir [25-27].

Poli-fital-amid (PPA) polimeri, hem yüksek termal dirençli olup hem de fiyat/performans açısından ön plana çıkan bir polimerdir [29]. Aynı zamanda, yüksek elastiklik modülüne, yüksek ısıl sapma sıcaklığına (HDT) ve yüksek ergime sıcaklığına da sahiptir [30-32]. PPA polimerinin genel kullanım alanları Şekil 1'de verilmiştir [32]. Yüksek termal özellikler ve yüksek kimyasal direnç özellikleri ile PPA polimeri aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı uygulamalarda geleneksel polimerlere alternatif olarak kullanılabilir. PPA polimeri, pahalı olmasına rağmen sıcaklık direnci istenen tribolojik uygulamalarda ön plana çıkmaktadır [33-36]. PPA polimerinin tribolojik özellikleri ile ilgili az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Hatipoğlu [29] %5 PTFE/PPA karışımlarının paslanmaz çelik diske karşı tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda artan yük miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığını belirtmiştir. Takayuki ve Yosuke [37] PTFE ilaveli ve karbon fiber takviyeli yarı-aromatik PA (PA10T) kompozitin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Matrise ilave edilen PTFE katkı, polimerin sürtünme katsayısı, spesifik aşınma oranı ve P:V (pressure x velocity) faktörü gibi tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir. Literatürde PPA polimeri ile kompozitlerinin tribolojik özelliklerine yük ve kayma hızının etkisi üzerine az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu deneysel çalışma ile literatürdeki bu eksikliği gidermek ve konuya ışık tutmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, katkısız PPA polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PPA polimer kompozitin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik deneylerde iki farklı hız (0.5 ve 1.0 m/s) ile 20, 30 ve 40 N gibi üç farklı yük kullanılmıştır. Bu test şartları altında çalışan malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. PPA polimer ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 2'de katkısız PPA polimeri ve %30 karbon fiber katkılı PPA kompozitten imal edilen ve tribolojik uygulamalarda kullanılan dişli sistemleri verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme ve Kompozitlerin Hazırlanması

(Preparation of Materials and Composites)

Deneylerde katkısız poli-fital-amit polimeri matris malzemesi Eurotec Mühendislik Plastikleri/İstanbul firmasından temin edilmiştir. Tecomid HT ticari isimli, 1.18 g/cm³ yoğunluğa, 310 °C ergime sıcaklığına ve %2.4 oranında nem oranına sahip olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak 6 mm uzunluğundaki kısa karbon fiber, AC 4101 ismi ile DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. %30 karbon fiber takviyeli poli-fital-amit kompozit granül formunda endüstriyel tip çift vidalı bir compound makinesi kullanılarak üretilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde besleme hunisi ile ekstrüzyon kalıbı arasındaki ısıtıcı sıcaklıkları 310-345 °C arasında ayarlanmıştır. Enjeksiyonla aşınma test numune üretimi yapılmadan önce granüller kurutulmuştur. Ekstrüde edilen karbon fiber takviyeli PPA polimer granüller 120 °C'de 4 saat fırında kurutulduktan sonra enjeksiyon kalıplama yöntemi ile basılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pim numuneler, çapı 6 mm ve uzunluğu 50 mm olacak şekilde özel olarak tasarlanmış kalıp kullanılarak üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde sıcaklık değerleri 310-340 °C arasında iken enjeksiyon basıncı 150 bar olarak ayarlanmıştır. Tablo 2'de kullanılan malzemeler, kısaltmaları ve üretim şartları verilmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen kırık yüzeyler JSM 6060LV kodlu JEOL marka taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüleri incelenmeden önce numune yüzeyleri 40A° kalınlığında altın ile kaplanmıştır.









2.2. Aşınma Testleri (Wear Tests)

Aşınma testleri, DIN X40CrMoV5-1 çelik diske karşı katkısız PPA ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompoziti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testleri kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Tablo 3'te deneylerde kullanılan polimer malzemeler ve aşınma deneyi proses şartlarının detayları verilmiştir. Pim numunelerin deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri Precia 220 marka 0,0001 gr hassasiyetli hassas terazi ile yapılmış ve spesifik aşınma oranı (K_o) hesaplanmıştır. Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma

mesafesi (m), ρ : malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3), F: uygulanan yük (N)'dur.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (1)$$

PPA Uygulamaları			
Otomotiv Endüstrisi	Tüketim Malları Endüstrisi	Elektrik Parçaları Endüstrisi	Petrol Çıkarma Endüstrisi
			
Elektrikli su pompası	Spatula	LED soketler	Pompa aşınma halkası
			
Hava emme monifoldu	Fan koruyucu	Hafıza kartı okuyucu	Gaz boruları
			
Motor koruyucu	Kahve makinesi parçaları	USB Tip-C 3.1 konnektör	Çubuk klavuzu

Şekil 1. PPA polimerinin genel kullanım alanları (General usage areas of PPA polymer) [32]



Şekil 2. PPA malzemeden imal edilen dişli uygulamaları (Gear applications made of PPA material) [38-40]

Tablo 1. Karbon fiber katkılı polimerler için literatür taraması ve sonuçları (Literature review and results for carbon fiber filled polymers)

Referans	Test türü	Katkının türü	Matris Malzemesi	Karşı disk malzemesi	Ortam Şartları	Yük	Kayma Hız	Kayma mesafesi/Test süresi	Sürtünme katsayısı/Aşınma oranı
5	Bilye-disk	%5-10-15 CF	%80PA6/%20PPS	Bilye: 6mm çapında krom çelik bilye	Kuru	10-15-20N	500-1000-1500rpm	-	CF ilavesi ile dayanım, modül ve sertlik değerleri artmış kopma uzaması ve darbe dayanımları azalmıştır. Kararlı hal aşınmasında, PA6/PPS/KF kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin PA6/PPS karışımına göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF miktarı arttıkça PA6/PPS/CF kompozitlerin aşınma oranı artmıştır. Yüksek yük ve yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayısının azalışı aşınma oranı artmıştır.
15	Pim-disk	%15 Kısa CF, %3 Çok duvarlı karbon nanotüp, %10 Grafit	PPS	Inconel 625 plaka, (Ra=0.07 µm)	Sulu	80 N	0.13 m/s	468-18.720m	Saf PPS ile karşılaştırıldığında, kısa CF katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı %60 oranında azalmış, aşınma oranını ise 3 kat daha fazla oranda artmıştır. ÇDKNT ve Gr ilavesi ile PPS kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını etkilenmemiştir.
6	Pim-disk	%2, 4, 8, 12 CF	ÇYMAPE	Paslanmaz çelik, (Ra=0.35)	Sulu	100 N	0.25 m/s	2 saat	ÇYMAPE/12CF kompozitlerin sürtünme katsayısının oluşan transfer film tabakasına bağlı olarak 27 dakika sonrasında, ÇYMAPE polimerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF ilavesi ile aşınma oranı azalmış ancak artan CF miktarı ile aşınma oranı artmıştır. En düşük aşınma oranı, %8 CF içeriğinde elde edilmiştir. Katkısız ÇYMAPE polimerine göre 2 kat daha düşük aşınma oranı elde edilmiştir.
8	Plaka-disk	%5, 10, 15 CF	PPS/PTFE	Çelik disk	Kuru	200 N 500 N	0.42 m/s	15.000m	%15 CF içeriğine ulaşıldığında PPS/PTFE kompozitlerin spesifik aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayısı 5.2×10^{-6} mm ³ /Nm ve 0.0085 değerine ulaşmış ve bu değerlerin PPS/PTFE karışımına göre sırasıyla %88 ve %47 oranlarında azalmıştır. Yükün artması ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı artmıştır.
16	Pim-disk	% 10 Kısa CF	PEI	100Cr6 (Ra=0.35)	Sulu	0.1-8 MPa	1-3 m/s	3600 m	Kısa CF/PEI kompozitler sulu ortam şartları altında kuru ortam şartlarına göre daha düşük sürtünme özellikleri elde edilmiştir. Kuru ve sulu ortam şartları altında aşınma direncinde farklılık gözlenmemiştir. Spesifik aşınma direnci 1×10^{-6} mm ³ /N.m olarak elde edilmiştir.
18	Bilye-disk	% 5, 10, 20, 30 CF (hacimsel)	PI	GCr15 çelik bilye, çapı:3 mm, Ra: 0.02 µm).	Kuru	5N	0.3 m/s	30 dakika	Artan sıcaklıklarda PI polimerinin sürtünme ve aşınma direnci gelişmiştir. 180 ve 260 °C gibi yüksek sıcaklıklarda, %20 karbon içeriğinde en düşük aşınma oranı ile birlikte, 0.054 ve 0.1 gibi en düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük ile sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri değişmiştir.
18	Pim-disk	Kısa CF, Grafit, Mikron altı TiO2, Mikron altı ZnS	PEEK PEI	Parlatılmış çelik disk, Ra: 220 nm	Kuru	1-4 MPa	1, 2, 3 m/s	-	Geleneksel katkılar (CF ve grafit) hem aşınma direncini hem de yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Mikron altı partiküller ise artan sıcaklıklarda sürtünme katsayısını ve aşınma oranını daha fazla azaltmıştır.
7	Bilye-Plaka	% 10, 20, 30 CF	PVDF	Paslanmaz çelik	Kuru	6-9-12-15 N	0.5, 4, 8, 12 Hz	30 dakika	CF katkılı PVDF kompozitlerin saf PVDF polimerine göre tribolojik özellikleri geliştirmiştir. Optimum aşınma azalımı %20 CF içeriğinde elde edilmiştir. Artan kayma frekansı ve uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve hacimsel aşınma oranı artmıştır.
23	Bilye-Plaka	%0-20 CF	Epoksi	Cr6 çelik pim	Kuru	3 cm/s	2-6 N	-	Artan CF miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma şiddeti azalmıştır. Yükün 2 N'dan 6 N'a artırılması ile sürtünme katsayısı ve aşınma şiddeti artmıştır.
17	Pim-disk	%10 kısa CF/%10 PTFE %10 aramit partikül/%10PTFE	PI	Bakır (Cu)	Kuru Sulu	0.5 m/s 1.0 m/s	1, 3, 6 MPa	2 saat	Kuru kayma şartları altında, kısa CF katkılı PI kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri aramit partikül katkılı PI kompozitine göre daha yüksektir. Aramit partiküllerinin kuru ortam şartlarında tribolojik özellikleri kısa karbon fiberine göre gelişmiş ancak sulu ortam şartlarında ise kötüleşmiştir. Sulu ortam şartları altında kayma meydana geldiğinde, zayıf arayüzey etkileşimi, aramit partikül katkılı PI kompozit yerine kısa CF katkılı PI kompozit için daha iyi bir sınır filmi oluşumu için faydalı olmuştur.
24	Bilye-disk	%10-20-30 CF (Hacimsel)	PA6	GCr15 çelik bilye, çapı:2 mm	Kuru	6-9-12-15 N	0.5, 4, 8, 12 Hz	2 saat	Artan yük ve kayma frekansı ile sürtünme katsayısının ve aşınma miktarı artmıştır. Optimum aşınma azalımı %20 karbon içeriğinde elde edilmiştir.
11	Pim-disk	%5-10-20-30 (Hacimsel) kısa CF %5-10-20-30 (Hacimsel) kısa KF	PES	Çelik, yüzey sertliği: HRC44-55	Kuru	800 gram	364 rpm	5 saat	KCF katkısı ile sürtünme katsayısı artarken bu artış %30 KCF oranında %48.8 elde edilmiştir. KKF ilavesi ise sürtünme katsayısını azaltmıştır. Katkısız PES ile karşılaştırıldığında, %20 KKF içeriğinde sürtünme katsayısı %29.8 oranında azalmıştır. PES polimerinin aşınma direnci KCF ve KKF ilavesi ile önemli oranda gelişmiştir. Fiber ilavesi ile PES kompozitlerin spesifik aşınma oranları %71.4 ve %95.7 oranlarında azalmıştır.
25	Bilye-Plaka	%5-15-25 (Hacimsel) CF	POM	Paslanmaz çelik	Kuru	6-9-12-15 N	1-4-8-12 Hz	-	Artan yük ile sürtünme katsayısı artmış, artan kayma frekansı ile azalmıştır. Hacimsel aşınma miktarları ise artan yük ve kayma frekansı ile artmıştır. POM polimerine ilave edilen %15 karbon içeriğinde optimum aşınma azalımı elde edilmiştir.
10	Pim-disk	%10-20 Kısa CF	PEEK	-	Kuru	1 MPa	200 r min	2 saat	PEEK polimerine ilave edilen KCF sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmıştır. Ancak, artan KCF miktarı ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. Çalışma sonucunda %10 KCF içeriğinde optimum tribolojik özellikler elde edilmiştir.
26	Pim-disk	%10 CF %10 CF/%0.5 ÇDKNT	PA66	AISI 1040 çelik disk	Kuru	20-30-40 N	0.4, 0.8 ve 1.2 m/s	1000 m	Artan kayma hızı ve uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı artmıştır. PA66 ve PA66 kompozitlerin aşınma oranı 10^{-10} mm ³ /N.m civarında elde edilmiştir. ÇDKNT ve CF ilavesi PA66 polimerinin aşınma direnci azalmıştır.

Tablo 1'in devamı

20	Pim-disk	%0-25 CF	YYPE	-	Sulu	180 N	100 R/min	-	KCF/YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma kayıpları katkısız YYPE polimerine önemli oranda azalmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak, KCF ilavesi ile YYPE kompozitlerin aşınma direnci artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı 40 °C altında 0.076 değeri ile %20 KCF takviyeli YYPE kompozit numunesinde elde edilmiştir.
21	Bilye-plaka	Grafitlen kaplı CF	Epoksi	Sertleştirilmiş krom çelik bilye	Kuru	55-75-95 N	8-12-16 Hz	20 dakika	Karbon fiberlerin grafit ile kaplanması sonucunda, fiberlerin matrisi ile bağlanma eğilimi artmış ve aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlamıştır. Karbon fiberlerin kaplanması ile aşınma oranı %52.39 oranında azalmıştır. 75 N'a kadar sürtünme katsayısı artmış bu değerden sonrasında azalmıştır. Kayma frekansı ve sıcaklık arttıkça, sürtünme katsayısı azalmıştır.
22	Bilye-disk	%5CF/%10MoS ₂ /%5Grafit/%5Grafit/%3SiO ₂	%60PEEK/%12PTFE	GGr15 çelik bilye,	Kuru	10 N	73.3 mm/s	-	Hem ortam atmosferinde (oda sıcaklığında) hem de vakum altında (20 ile -100 °C sıcaklık aralığında) sürtünme katsayısı 0.1 değerinin altında elde edilmiştir. PEEK/PTFE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sıcaklığa bağlı olarak değişmiş ve en düşük değerlere -70 °C'de ulaşmıştır. Grafit ve grafit -30 °C üzerindeki sıcaklıklarda yağlayıcılık etkisi göstermiştir. Oluşan transfer film tabakasının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde kritik bir faktör olduğu belirtilmiştir.
9	Bilye-disk	%2-3-5 Aramit fiber %2-3-5 PTFE	ÇYMAPE	Tungsten karbür	Kuru	10 N	20 cm/s	500 m	ÇYMAPE polimerine ilave edilen PTFE ve aramit fiber ile spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı azalırken, PTFE oranına bağlı olarak spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı artmıştır. PTFE polimerinin düşük sürtünme katsayısı nedeni ile kayma prosesi süresince aramit fibere göre daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Tablo 2. Karbon fiber katkılı polimerler için literatür taraması ve sonuçları (Literature review and results for carbon fiber filled polymers)

Sıra No	PPA (ağırlık olarak)	Karbon fiber (ağırlık olarak)	Proses şartları
1	100	-	Çift vidalı compound makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 310-345 °C, Enjeksiyon makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 310-340 °C, Enjeksiyon basıncı:150 bar
2	70	30	

Tablo 3. Polimer malzemeler ve deney şartları (Polymer materials and test conditions)

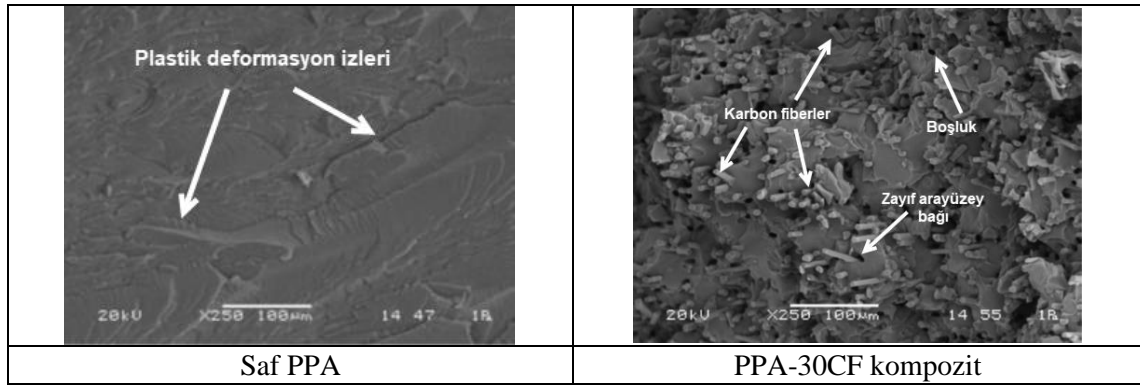
Malzeme	Kayma hızı (m/s)	Yük (N)	Kayma mesafesi (m)	Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)
PPA	0.5	20	2000	21±2	1.18
PPA-30CF	1.0	30			1.40

3. BULGULAR (RESULTS)

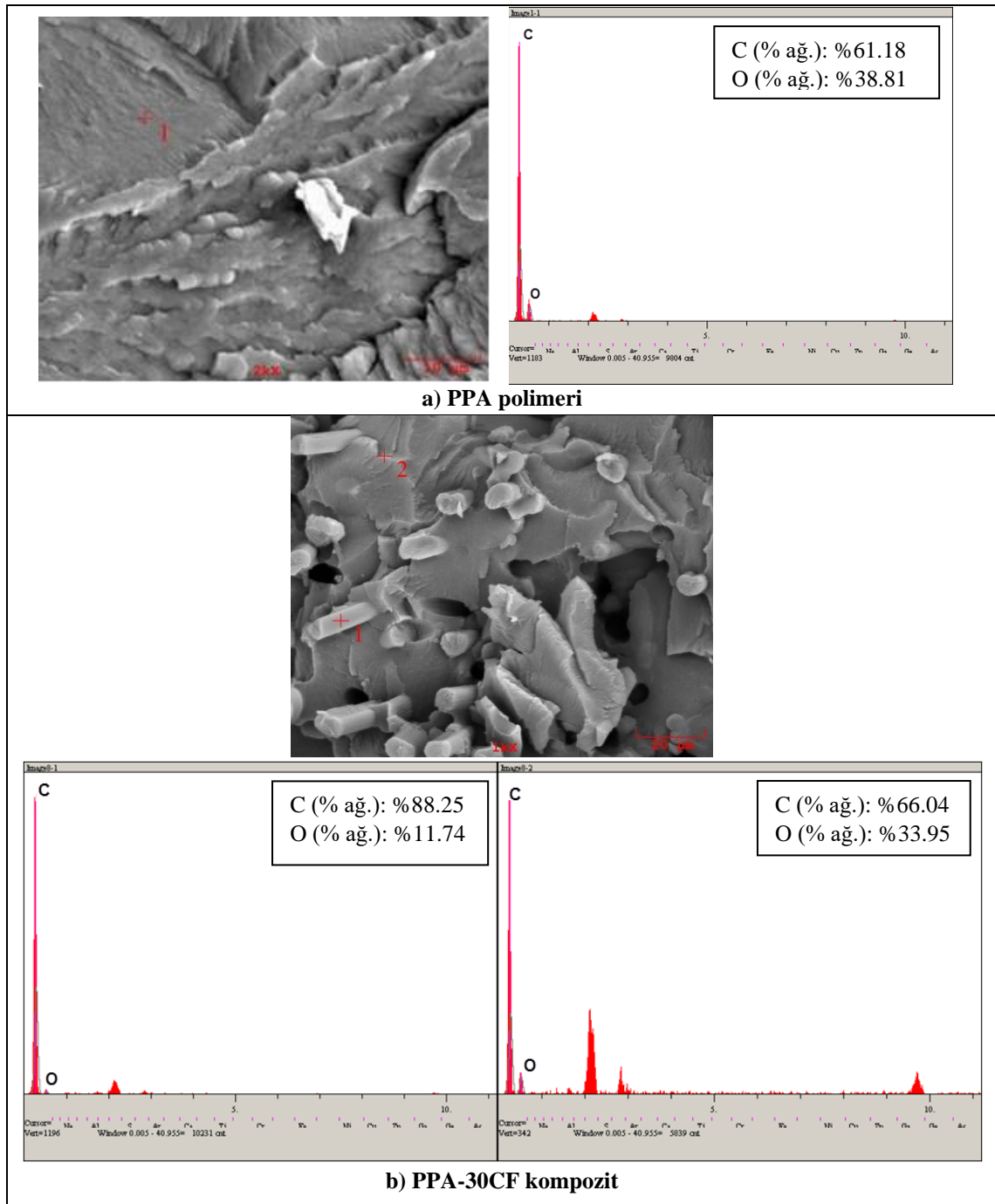
Şekil 3'te saf PPA polimeri le %30 oranında CF katkılı PPA kompozitin kırık yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM)

görüntüleri verilmiştir. Şekil 3-a'da görüldüğü gibi saf PPA polimerinin kırılma yüzeyinde plastik deformasyonun olduğu gözlenmiştir. Şekil 3-b ise CF takviyeli PPA kompozitin kırık yüzeyini göstermekte olup karbon fiberlerin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı, CF ilavesi ile PPA polimer kompozitin gevrekleştiği ve kırık yüzeyin düzgün olarak kırıldığı gözlenmiştir. Bazı bölgelerde karbon fiberin PPA polimeri ile iyi bir bağ yapmadığı ve matris malzemesinden sıyrılarak boşluk oluşturduğu da gözlenmiştir.

Şekil 4 a ve 4 b'de sırasıyla saf PPA polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin EDS analizi ve belirtilen noktalarda yapılan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, gerek saf PPA polimeri gerekse PPA-30CF kompoziti için yapısındaki karbon ve oksijen elementlerinin varlığı görülmektedir. Saf PPA polimeri için ağırlıkça karbon oranı %61.18 oranında iken ağırlıkça oksijen oranı %38.81 oranındadır. PPA-30CF kompozit numunesinin farklı yerlerinden alınan EDS analizlerinde de yapıdaki karbon ve oksijen varlığı görülmektedir.

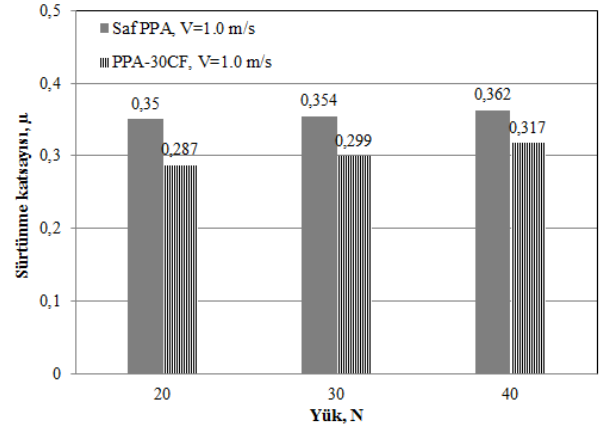


Şekil 3. Saf PPA ve %30 oranında karbon fiber takviyeli PPA kompozitin kırık yüzey mikroyapı görüntüsü (Fractured surface microstructure image of pure



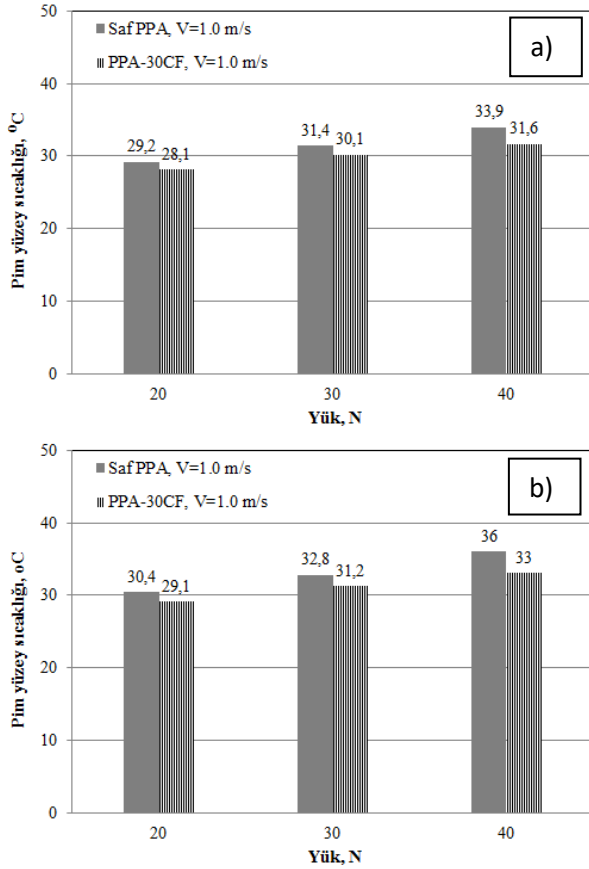
Şekil 4. EDS analizi ve belirtilen noktalarda yapılan EDS analiz sonuçları (% ağı.) (EDS analysis and results of EDS analysis at specified points (% wt.))

Şekil 5'te saf PPA polimeri ile %30 CF takviyeli PPA kompozitin yük-sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yük miktarının 20 N'dan 40 N'a artırılması ile sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Saf PPA polimeri için 20 N'da sürtünme katsayısı 0.35 değerinde iken 40 N yük altında 0.362 olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim %3.42 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, PPA-30CF kompozit malzemesi için 20 N'da sürtünme katsayısı 0.287 değerinde iken 40 N yük altında 0.317 olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim %10.45 olarak belirlenmiştir. Benzer sonuçlar Li ve Li [7], Li ve Xia [24] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Ancak, Zhou ve arkadaşları [5] artan yük ile PA6/PPS karışımı kompozitlerin sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte grafit kristal elyafın daha fazla kırılması ve sıkışması sonucu sürtünme katsayısını azalttığı belirtilmiştir. Katkısız PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitin sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında 20 N yük altında PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber sürtünme katsayısını %21.95 oranında, 30 N yük altında %18.3 oranında ve 40 N yük altında %14.19 oranında azaltmıştır. PPA polimerine ilave edilen CF, mukavemet ve elastiklik modülü değerlerini artırmıştır [41]. Yumuşak olan polimer matris içerisindeki sert faz olan karbon fiber, uygulanan yük altında karşı temas yüzeyi ile gerçek temas alanını azaltarak yapışma kuvvetini ve pulluk (kazıma) etkisini azaltabilir [8, 42]. Dolayısıyla saf PPA polimerine göre sürtünme katsayısı önemli oranda azalmıştır. Golchin ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada da PPS polimerine ilave edilen KCF, Gr ve ÇDKNT dolgu malzemeleri içerisinde en düşük sürtünme katsayısının KCF-PPS kompozitinde elde edildiğini ve sürtünme katsayısını azaltmanın etkili dolgu malzemesinin karbon fiber olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin yük-sürtünme katsayısı grafiği (Load-friction coefficient graph of pure PPA polymer and PPA-30CF composite)

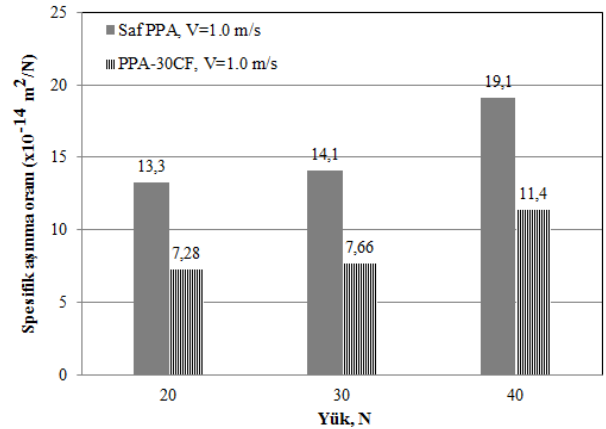
Şekil 6'da saf PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak pim ve disk yüzey sıcaklıklarındaki değişim verilmiştir. Şekil 6-a'da gösterildiği gibi hem saf PPA polimeri hem de PPA-30CF kompozitin pim yüzey sıcaklıklarının artan yük ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Uygulanan yükün 20 N'dan 40 N'a artırılması ile PPA polimerinin sıcaklığı 29 °C'den 34 °C'ye, PPA-30CF kompozitin sıcaklığı 28 °C'den 31.6 °C'ye arttığı belirlenmiştir. Şekil 6-b'de ise çelik disk yüzeyin sıcaklık değişimi verilmiştir. Çelik disk yüzey sıcaklığının uygulanan yüke bağlı olarak 30-36 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Hem pim hem çelik disk yüzey sıcaklıklarına karbon fiberin etkisi incelendiğinde sıcaklığın azaldığı belirlenmiştir. PPA polimerine ilave edilen karbon fiber termal iletkenliği etkileyerek PPA kompozitin ısı transferini etkilemiştir. Uygulanan yük ve kayma hızı aralıklarında, yüzey sıcaklıklarının azalmasının sebebi karbon fiber katkının sürtünme kaynaklı termal etkiyi engellemesidir [25]. Dong ve arkadaşları da [18] karbon fiber takviyesi ile kompozitin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) arttığını ve yüksek sıcaklıklarda yüksek termo-mekanik özelliklerin korunduğunu belirtmiştir.



Şekil 6. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak a) pim yüzey sıcaklıkları b) çelik disk yüzey sıcaklığı değişimi (Variation of depending on the applied load of pure PPA polymer and PPA-30CF composite; a) pin surface temperatures b) steel disc surface temperature variation)

Şekil 7’de saf PPA polimeri ile %30 CF katkılı PPA kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranındaki değişim verilmiştir. Saf PPA polimeri için uygulanan yükün artması ile spesifik aşınma oranı %43.6 oranında artmıştır. Benzer şekilde PPA-30CF kompozitin spesifik aşınma oranı %56.5 oranında artmıştır. PPA polimerine ilave edilen CF 20 N yük altında aşınma oranını %82.6 oranında, 30 N yük altında %84.0 oranında ve 40 N yük altında %67.5 oranında azaltmıştır. Kayma hızı ve yükün etkisi genel olarak değerlendirildiğinde, en yüksek aşınma oranı $19.1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile saf PPA polimerinde elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı ise $7.28 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile PPA-30CF kompozit numunesinde elde edilmiştir. Görüldüğü gibi PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber PPA polimerinin aşınma direncini önemli oranda artırmıştır. Genellikle, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin aşınma direnci iki farklı yaklaşım ile değerlendirilmektedir. Bunlardan birincisi, artan karbon fiber miktarı ile yumuşak matris ile sert

çelik yüzeyi arasındaki gerçek temas alanı azalarak aşınma direnci azalmaktadır [43]. Diğeri ise karbon fiber incebilir, çatlayabilir ve hatta matristen dışarı çıkabilir ve çıkan bazı CF partikülleri üçüncü bir abrasif aşındırıcı gibi davranarak aşınma direncinin kötüleşmesine sebep olabilmektedir [44]. Bu çalışmada SEM resimlerinde de görüldüğü gibi karbon fiber ve PPA polimerleri arasında genel olarak iyi bir yapışma sağlandığı ve dolayısıyla sürtünme ve aşınma özelliklerinin geliştiği düşünülmektedir. Golchin ve arkadaşları [15] sürtünme katsayısının azaltılmasında en etkili dolgu malzemesinin karbon fiber olduğunu belirttikleri çalışmada aşınma direncini de saf PPS polimerine göre 3 kat daha fazla geliştiren dolgu malzemesinin yine karbon fiber olduğunu belirtmişlerdir. Li ve Zhang [45] malzemelerin aşınma direncini etkileyen diğer bir faktörün yüzey sertliği olduğunu belirtmişlerdir. Daha sert bir yüzey sertliğinin daha yüksek aşınma direnci ile sonuçlanacağı belirtilmiştir. Karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde, sertliği artıran ve aşınma oranı ile sürtünme katsayısını azaltan, yumuşak faz içerisinde dağılmış sert ikinci bir fazın (CF) ilave edilmesi olarak açıklanmıştır.

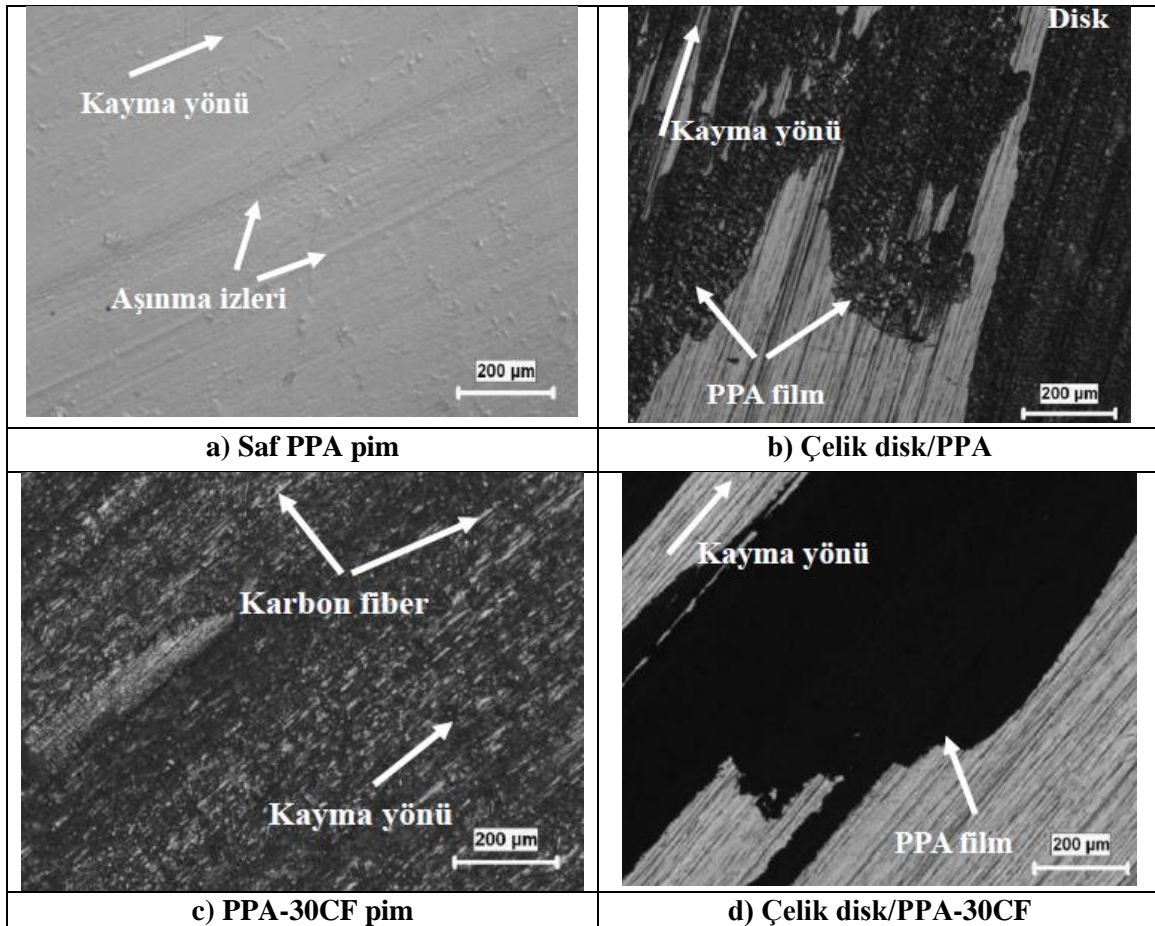


Şekil 7. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi (The variation of the specific wear rate of pure PPA polymer and PPA-30CF composite with applied load)

Şekil 8’de ise saf PPA polimeri ile PPA-30CF kompozit numunelere ait aşınma testleri sonucu elde edilen disk ve pim yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Her iki disk yüzeyi incelendiğinde transfer film tabakası adı verilen ve disk yüzeyini kaplayarak metal-polimer temasını engelleyen tabakanın oluştuğu gözlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da transfer film tabakasının sürtünme katsayısı ve aşınma direncinin şekillenmesinde önemli bir rol

oynadığı belirtilmiştir. Grafitleştirilen karbon fiberin yağlayıcılık özelliğinin polimer kompozitin çelik diske teması esnasında sürtünme katsayısının azalmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Karbon fiberin çok iyi yağlayıcılık özelliğine sahip grafit kristallerine ayrışabileceği bilinmektedir. Grafit kalıntılarının (debris) karşı disk yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak aşınma sürecini önemli oranda azaltacağı belirtilmiştir [7, 11, 18]. Bu çalışmada da PPA polimerinde yoğun olmayan bir film tabakası gözlenirken PPA-30CF kompozitinde daha yoğun ve yüzey alanını kaplayan bir film tabakası olduğu gözlenmiştir. Pim optik yüzey görüntüleri incelendiğinde ise saf PPA polimerinde kayma yönü doğrultusunda aşınma izlerinin olduğu belirlenmiştir. PPA-

30CF kompozitin pim yüzeyinde karbon fiberlerin varlığı görülmektedir. Gerek karbon fiber gerekse oluşan transfer film tabakası aşınma izlerinin oluşumunu azaltmıştır. Zhao ve arkadaşları [11] fiber takviyeli kompozitlerin aşınma prosesinin, fiber-matris bağının ayrılmasını takiben mikro-çatlama ve mikro-kesme sonucu fiber kırılması ve kayma gerilimi nedeniyle mikro-pulverize aşınmalarından oluştuğunu belirtmişlerdir. Kısa cam fiber tarafından toz haline gelen parçacıkların GF/PES kompozitin sürtünme katsayısını artırdığı belirtilirken, kısa karbon fiberlerin toz haline gelmesiyle oluşan grafit parçacıklarının yüzeyde yağlayıcı bir transfer film tabakası oluşturarak sürtünme ve aşınma direncini geliştirdiği belirtilmiştir [11].



Şekil 8. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin pim ve disk aşınma yüzeylerine ait optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Yük: 40N, Hız 1.0m/s) (Optical microscope microstructure images of pin and disc wear surfaces of pure PPA polymer and PPA-30CF composite (Load: 40N, Speed 1.0m/s))

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Saf PPA polimeri ve PPA/30CF kompozitlerin sürtünme katsayısı uygulanan yük artışı ile artış göstermiştir.

- PPA polimerinin sürtünme katsayısı 0.35-0.36 aralığında değişirken karbon fiber takviyeli PPA kompozitinde 0.28-0.31 aralığında elde edilmiştir.
- Yükün artırılması ile PPA polimeri ile PPA/30CF kompozitlerin spesifik aşınma oranları artmıştır.
- PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber kompozitin spesifik aşınma oranının ortalama %78 oranında azaldığını göstermiştir.
- Transfer film tabakası sürtünme katsayısının azalmasında ve aşınma direncinin artmasında önemli rol oynamıştır.
- PPA/30CF kompoziti dişli çark gibi makine elemanı imalatında endüstrinin birçok alanında özellikle triboloji alanında kullanılabilecek olup dişli ömrünün artmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2013-50-01-006).

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)

Gizem HATİPOĞLU, Hüseyin ÜNAL ve Salih Hakan YETGİN: Deneylerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım aşamalarında eşit katkı sağlamışlardır.

They contributed equally to the experiments, the analysis of the results and the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nuruzzaman D.M., Iqbal Asif A.K.M., Oumer A.N., Ismail N.M., Basri S., Experimental Investigation on the

- Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Nylon, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 114 (2016) 012118.
- [2] Essabir H., Denis R., Rachid B., Abou el K.Q., Effect of Nylon 6 (PA6) Addition on the Properties Glass Fiber Reinforced Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, Polymer Composites, (2018) 14-21.
- [3] Niyaraki M.N., Faramarz A.G., Ismail G., Sajjad D., Predicting of Impact Strength and Elastic Modulus of Polypropylene/EPDM/Graphene/Glass Fiber Nanocomposites by Response Surface Methodology, Technical Journal, 15 No. 2 (2021) 169-177.
- [4] Ünal H., Yetgin S.H., Köse S., Tribological Performance of Polyamide 6/wax Blend for Rolling Bearing, Bushing and gear applications, International Journal of Chemistry and Technology, 7 No. 1 (2023) 77-83.
- [5] Zhou S., Qiaoxin Z., Chaoqun W., Jin H., Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Mechanical and Tribological Properties of Polyamide6/Polyphenylene Sulfide Composites, Materials and Design, 44 (2013) 493-499.
- [6] Chukov D.I., Stepashkin A.A., Maksimkin A.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D., Kuskov K.V., Bugakov V.I., Investigation of Structure, Mechanical and Tribological Properties of Short Carbon Fiber Reinforced UHMWPE-Matrix Composites, Composites Part B, 76 (2015) 79-88.
- [7] Li J., Li X.Z., Evaluation of the Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced Poly(vinylidene fluoride) Composites, Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG), 19 No. 7 (2010) 1025-1030.
- [8] Luo W., Qi L., Yi L., Shengtai Z., Huawei Z., Mei L., Enhanced Mechanical and tribological Properties in Polyphenylene Sulfide/Polytetrafluoroethylene Composites Reinforced by Short Carbon Fiber, Composites Part B, 91 (2016) 579-588.
- [9] Gürgen S., Osman N.Ç., Melih C.K., Tribological Behavior of UHMWPE Matrix Composites Reinforced with PTFE Particles and Aramid Fibers, Composites Part B, 173 (2019) 106949.
- [10] Li F., Ying H., Xiaochen H., Xiyu H., Dong J., Thermal, Mechanical, and Tribological Properties of Short Carbon Fibers/PEEK composites, High Performance Polymers, 30 No. 6 (2018) 657-666.

- [11] Zhao Z.K, Sen-Sen D., Fei L., Hong-Mei X., Yuan-Qing L., Wei-Gang Z., Ning H., Shao-Yun F., Mechanical and Tribological Properties of Short Glass Fiber and Short Carbon Fiber Reinforced Polyethersulfone Composites: A Comparative Study, *Composites Communications*, 8 (2018) 1–6.
- [12] Mahesha C.R, Shivarudraiah, Mohan N., Suprabha R., Three Body Abrasive Wear Studies on Nanoclay/NanoTiO₂ filled Basalt-Epoxy Composites, *Materials Today: Proceedings*, 4, No. 2, Part A, (2017) 3979-3986.
- [13] Suresha B., Mechanical and Three-Body Abrasive Wear Behaviour of SiC Filled Glass Epoxy Composites, *Polymer Composites*, 29 No. 9 (2008) 1020-1025.
- [14] Chairman, C.A., Kumaresh Babu S.P., Three-Body Abrasive Wear Behavior of Basalt and Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Applied Mechanics and Materials*, 121-126 (2011) 534-538.
- [15] Golchin A., Klaus F., Andreas N., Braham P., Tribological Behavior of Carbon-Filled PPS Composites in Water Lubricated Contacts, *Wear*, 328-329 (2015) 456–463.
- [16] Zhang Y.Y., Qing C., Xiao-Long M., Pei H., Yuan-Qing L., Cai-Chao Z., Ning H., Shao-Yun F., Tribological Behavior of Short Carbon Fiber Reinforced Polyetherimide Composite under Water Lubrication Conditions, *Composites Science and Technology*, 216 (2021) 109044.
- [17] Huimin Q., Chao H., Ga Z., Jiabin Y., Yafeng Z., Hongtu H., Comparative Study of Tribological Properties of Carbon Fibers and Aramid Particles Reinforced Polyimide Composites under Dry and Sea Water Lubricated Conditions, *Wear*, 436–437 (2019) 203001.
- [18] Dong F., Guoliang H., Hao L., Liang L., Fengxiang C., Jianzhang W., Fengyuan Y., An Investigation on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber/Polyimide Composites at Elevated Temperatures, *Polymer Composites*, 39, No. 2 (2018) 869-882.
- [19] Chang L., Zhong Z., Lin Y., Klaus F., Tribological Properties of High Temperature Resistant Polymer Composites with Fine Particles, *Tribology International*, 40 (2007) 1170–1178.
- [20] Zhong W., Siqiang C., Zhe T., High-Temperature Tribological Behavior of HDPE Composites Reinforced by Short Carbon Fiber under Water-Lubricated Conditions, *Materials* 15 (2022) 4508.
- [21] Singh M., Srihari D., Rakesh K.G., Vijay Kumar S., Effect of Load, Sliding Frequency, and Temperature on Tribological Properties of Graphene Nanoplatelets Coated Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 57 No. 1 (2023) 121–132.
- [22] Cui W., Khalid R., Zhijun Z., Chengguo Y., Liming T., Weihua Z., Wanhua C., Shiguang P., Qiang X., Liran M., Yuanzhong H., Daxiong L., Bo L., Tingmei W., Tianbao M., Role of Transfer Film Formation on the Tribological Properties of Polymeric Composite Materials and Spherical Plain Bearing at Low Temperatures, *Tribology International*, 152 (2020) 106569.
- [23] Khun N.W., He Z., Lee Hoon L., Chee Yoon Y., Xiao H., Jinglei Y., Tribological Properties of Short Carbon Fibers Reinforced Epoxy Composites, *Friction* 2 No. 3 (2014) 226–239.
- [24] Li J., Xia Y.C., Evaluation of Tribological Properties of Carbon Fiber-Reinforced PA6 Composites, *Polymer Composites* 31, No. 3 (2010) 536-542.
- [25] Yuqin T., Junlong H., The mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced POM Composites, *Applied Mechanics and Materials*, 182-183 (2012) 135-138.
- [26] Ozsarıkaya B., Yetgin S.H., Unal H., Tribological Properties of Carbon Fiber and Multi-Walled Carbon Nanotube Filled Polyamide 66 Composites, *Proceedings of the International Conference BALTRIB'2019*, 14–16 November 2019, 33-41.
- [27] Kamlendra V., Shubrajit B., Sumit P. Effect of Graphite on Tribological and Mechanical Properties of PA6/5GF Composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (2023) <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11939-8>
- [28] Kumar S.S., Kanagaraj G., Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 4347–4357.
- [29] Hatipoğlu G., Poli-tetra-flor-etilen Katkılı Poli-Fital-Amid Polimer Karışımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, II-III (2014) 09-14.
- [30] Mateo G de G., Manjusri M., Arturo R.U., Amar K.M., Insights on the Structure-

- Performance Relationship of Polyphthalamide (PPA) Composites Reinforced with High-Temperature Produced Biocarbon, RSC Advances - The Royal Society of Chemistry, 10 (2020) 26917.
- [31] Mateo G de G., Manjusri M., Stefano G., Amar K.M., Statistical Design of Biocarbon Reinforced Sustainable Composites from Blends of Polyphthalamide (PPA) and Polyamide 4,10 (PA410). *Molecules*, 26 (2021) 5387.
- [32] Mateo G de G., Manjusri M., Amar K.M., Polyphthalamide Polymers: A review on Synthesis, Properties, and Advance Manufacturing and Emerging Applications, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (2022) 52965.
- [33] Glenn P.D., Characterization and Properties of Polyphthalamide/Polyamide Blends and Polyphthalamide/Polyamide/Polyolefin Blends, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2 No. 3 (1996) 229-234.
- [34] Djukic S., Anthony B., Jerome B., Didier R.L., Mechanical Properties of Amorphous and Semi-crystalline Semi-aromatic Polyamides, *Heliyon*, 6 (2020) 03857.
- [35] Cao L., Shuling D., Ziqin H., Zhidan L., Mingqing L., Peng Z., Wei L., Effects of Carbon Nanotube on Mechanical, Crystallization, and Electrical Properties of Binary Blends of Poly(phenylene sulfide) and Polyphthalamide, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125 (2016) 927–934.
- [36] Sandro D.M., Antidio de O.S.N., Maria Odila H.C., Eduardo C.B., Replacement of Metallic Parts for Polymer Composite Materials in Motorcycle Oil Pumps, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 No. 2 (2017) 149–160.
- [37] Takayuki O., Yosuke N., Influence of Addition of PTFE on the Tribological Properties of CF Reinforced Plant-Derived Semi-Aromatic Polyamide (PA10T) Biomass Composites. *AIP Conference Proceedings*, 2065 (2019) 040008.
- [38] <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/polyamide-ppa/> (Erişim 03.03.2023).
- [39] <http://www.hxgcs.com/en/product/288.htm> 1 (Erişim 03.03.2023)
- [40] <https://picclick.it/Ingranaggio-Main-gear-corpo-farfallato-Drosselklappe-Audi-Volkswagen-165450877162.html>
- [41] Gizem H., Polifitalamid Kompozitlerin Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri, Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 2014.
- [42] Kukureka S. N., Hooke C. J., Rao M., Liao P., Chen Y. K., The Effect of Fibre Reinforcement on the Friction and Wear of Polyamide 66 Under dry Rolling–Sliding Contact, *Tribology International*, 32 (1999) 107–116.
- [43] Tanaka K., Friction and Wear of Glass and Carbon Fiber-Filled Thermoplastic Polymers, *Journal of Tribology*, 99 No. 4 (1977) 408-414.
- [44] Suresha B., Chandramohan G., Samapthkumaran P., Seetharamu S., Three-body Abrasive Wear Behaviour of Carbon and Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Materials Science and Engineering: A*, 443 No. 1 (2007) 285-291.
- [45] Li J., Zhang L.Q., The Research on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber and Carbon Nanotube-Filled PEEK Composite, *Polymer Composites*, 31 No. 8 (2010) 1315-1320.

Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment

Mustafa KOP^{1*} , Salih YAZICIOĞLU² 

¹National Defense University, Turkish Military Academy, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

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

²Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 16/03/2023
Revision: 22/05/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Geopolymer
Blast Furnace Slag
Fly Ash
Sodium Silicate
Sodium Hydroxide

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/03/2023
Düzeltilme: 22/05/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Yüksek Fırın Cürufu
Uçucu Kül
Sodyum Silikat
Sodyum Hidroksit

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study; geopolymer mortars with different molarities containing high furnace slag, fly ash, and hybrid mixtures were investigated for their mechanical and microstructural properties under thermal curing conditions. / Bu çalışmada; yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışımlar içeren farklı molaritelere sahip geopolimer harçların ısı kütür koşulları altında mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

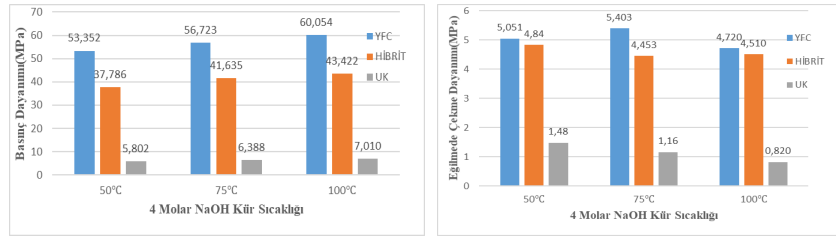


Figure A: Flexural and compressive strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration / **Şekil A:** 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kütür şartlarındaki basınç ve eğilmede çekme dayanımı

Highlights (Önemli noktalar)

- Effect of thermal curing on the mechanical and microstructural properties of geopolymer mortars / Isıl kütürün geopolimer harçlarda, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi
- The mechanical and microstructural properties of low molarity geopolymer mortars / Düşük molariteli geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özellikleri
- The mechanical and microstructural properties of high furnace slag, fly ash, and hybrid geopolymer mortars / Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özellikleri

Aim (Amaç): The aim of this study is to determine the mechanical properties of fly ash and high furnace slag-based geopolymer mortars under thermal curing conditions. / Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların ısı kütür ortamında mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): In this study, the mechanical and microstructural properties of geopolymer mortars with high furnace slag and fly ash additives were determined under different curing temperatures using 4M, 8M, and 12M NaOH (Sodium Hydroxide) and Na₂SiO₃ (Sodium Silicate) as alkali activators. / Bu çalışmada alkali aktivatör 4M, 8M, 12M NaOH ve Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat) kullanılarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer harçların farklı sıcaklıklarda ısı kütür ortamında mekanik ve mikroyapı özellikleri belirlenmiştir.

Results (Bulgular): The average flexural strength of the samples produced with 4M NaOH, Na₂SiO₃ and blast furnace slag was 5.4 MPa and the compressive strength was 60.05 MPa. / 4M NaOH, Na₂SiO₃ ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımı 5,4 MPa ve basınç dayanımı 60.05 MPa sonuçları elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): The compressive strengths of the specimens increased with the increase in curing temperature, but in general, their flexural tensile strengths decreased. It has been observed that the compressive and flexural strengths of the samples produced with fly ash are quite low compared to the blast furnace slag. / Kütür sıcaklığının artmasıyla numunelerin basınç dayanımları artmıştır, ancak genel olarak eğilmede çekme dayanımları azalmıştır. Uçucu kül ile üretilen numunelerde basınç ve eğilmede çekme dayanımları yüksek fırın cürufuna göre oldukça düşük olduğu görülmüştür.



Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment

Mustafa KOP^{1*} , Salih YAZICIOĞLU² 

¹National Defense University, Turkish Military Academy, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

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

²Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 16/03/2023
Revision: 22/05/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Geopolymer
Blast Furnace Slag
Fly Ash
Sodium Silicate
Sodium Hydroxide

Abstract

As a result of the clinker production of cement, CO₂ emission, which harms the nature and causes global warming, occurs. For this reason, studies continue on the production of geopolymer mortar by using mineral additives instead of Portland cement in order to reduce CO₂ emissions. In this study, 4M, 8M, 12M NaOH and Na₂SiO₃ (Sodium Silicate) were used as alkali activators. The ratio of Na₂SiO₃/NaOH was determined as 2 and kept constant in all experimental series. By producing blast furnace slag, fly ash and 50% hybrid geopolymer mortars from both, curing was carried out in the oven bag at 50 °C, 75 °C, 100 °C for 12 hours. In order to determine the mechanical properties of the samples after curing, flexural and compressive strength and Scanning Electron Microscope (SEM) tests were carried out for microstructure analysis. According to the results obtained, the compressive strength for all samples provided the best performance at 100 °C. The average flexural strength of the samples produced with 4M NaOH, Na₂SiO₃ and blast furnace slag was 5.4 MPa and the compressive strength was 60.05 MPa. It has been observed that the compressive and flexural strengths of the samples produced with fly ash are quite low compared to the blast furnace slag.

Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cüruf Esaslı Geopolimer Harçların Isıl Kür Ortamında Mekanik Özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/03/2023
Düzeltilme: 22/05/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Yüksek Fırın Cürufu
Uçucu Kül
Sodyum Silikat
Sodyum Hidroksit

Öz

Çimentonun klinkeri üretimi sonucu, doğaya zarar veren ve küresel ısınmaya neden olan CO₂ salınımı oluşmaktadır. Bu sebeple CO₂ salınımını azaltmak için portland çimentosu yerine mineral katkı malzemeleri kullanılarak geopolimer harç üretimi üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada alkali aktivatör olarak 4M, 8M, 12M NaOH ve Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat) kullanılmıştır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 olarak belirlenip bütün deney serilerinde sabit tutulmuştur. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve her ikisinden %50 oranında hibrit geopolimer harçlar üretilerek 12 saat süresince fırın torbası içerisinde 50 °C, 75°C, 100°C etüvde kür uygulaması yapılmıştır. Kür uygulaması sonucunda mekanik özelliklerini belirlemek için numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı, mikroyapı analizleri için ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün numuneler için basınç dayanımı 100 °C'de en iyi performansı sağlamıştır. 4M NaOH, Na₂SiO₃ ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımı 5,4 MPa ve basınç dayanımı 60.05 MPa sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül ile üretilen numunelerde basınç ve eğilmede çekme dayanımları yüksek fırın cürufuna göre oldukça düşük olduğu görülmüştür.

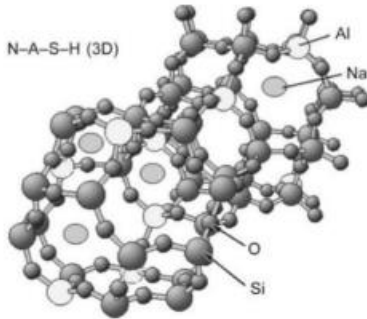
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, çimento endüstrisinin çevreye verdiği zararlar önemli bir küresel endişeye yol açmıştır [1].

1 ton çimento, üretimi sırasında 1 ton CO₂ üretir [2–5]. CO₂, üretiminin her kilogramı için yaklaşık 0,66–0,82 kg ölçen ve küresel ısınmaya yol açabilecek ve dolayısıyla çevresel durumu etkileyebilecek zararlı

bir sera gazıdır [6-7]. Dünya çapındaki yıllık çimento üretimi, yılda %5 artışla 2050 yılında yaklaşık 4,38 milyar ton olacağı düşünülmektedir [8]. Bu nedenle portland çimentosunun yerine alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Geopolimerler, farklı türden mineral katkı malzemeleri kullanılarak harç ve beton formülasyonu için geniş çapta araştırmalar yapılmıştır [9-13].

Geopolimerler yarı kristal veya amorf yapıya ve inorganik polimerik malzeme türüdür. Geopolimer malzemelerin üretimi için, yüksek oranda silisyum ve alüminyum oksit içeren alüminosilikat malzeme ve Na (sodyum) veya K (potasyum) silikatlar ve hidroksitlerin alkali çözeltisi olarak kullanılır. Geopolimerler ilk olarak, termoset polimerlere göre sıcaklığa daha dayanıklı alternatifler olarak geliştirilmiştir ancak günümüzde çeşitli uygulamalarla inşaat malzemeleri olarak da geliştirilmektedir [14]. Alkali aktivasyon teknolojisi 1908'de Kuhl tarafından tanıtılmıştır [15]. Geopolimer kompozitlerin özellikleri ve dayanıklılığı bazen Portland çimentosundan elde edilenlerden bile daha iyidir [16]. Yüksek basınç dayanımı, oligomerlerin birbirine bağlı yapısı ile ilişkilidir [17-18]. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi alüminat ve silis içeriği zengin olan malzemeler alkali aktivasyon ile birlikte ortaya çıkan temel reaksiyon, amorf yapıdaki N-A-S-H alkali alüminosilikat hidrattır. Silisyum ve alüminyum düzgün dört yüzlü yapı şeklindeki rastgele dağılırarak ürünün üç boyutlu yapısını oluşturmaktadır. N-A-S-H jeline ait üç boyutlu görünüm Şekil 1'de verilmiştir.[19]



Şekil 1. N-A-S-H jeline ait üç boyutlu görünüm

[20] (Three dimensional view of N-A-S-H gel)

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünlerinden biridir. Bu atık malzemenin bileşimi,

kömür kaynağına ve yakma koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Uçucu külün kimyasal bileşimi, kristalin ve cam fazların içerikleri ve parçacık boyutu dağılımı, ön maddenin reaktivitesini ve alkali çözeltilerdeki çözünürlüğünü belirleyen faktörlerdir. Geopolimerin mikro yapısı ise, özellikle partikül inceliği, amorf fazın bileşimi ve oksitlerin içeriği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin eritilmesiyle bir yan ürün olarak ortaya çıkar. Bu malzeme, mineral bağlayıcıların üretiminde kullanılan kalsiyumca zengin bir hammaddedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, gehlenit ve akermanit gibi bileşenlerin oldukça camsı fazların bir karışımını içermektedir. [21].

Genel olarak geopolimer malzemelerde yeterli mukavemet artışını sağlamak için tipik bir fırın kullanılarak 6-48 saat aralığında ve 40-90 °C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılarak uygulanır [22]. Yazıcı ve Karagöl yapmış oldukları çalışmada 90°C ve 72 saat ısı küründe NaOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatörlerin birlikte kullanımının erken yaş dayanımını artırdığını belirtmişlerdir [23]. Danial Nasr v.d. yapmış oldukları çalışmada kür şartlarının ve alkali aktivatör yoğunluklarının (su, ısıtma ve çevresel kurlama), alkali aktif cüruf harçlarının ısıtma direnci özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, alkali aktivatörünün oranları ne olursa olsun su ve çevresel kurlama koşullarına kıyasla, ısıtma kurlama yüksek sıcaklıkların etkisiyle alkali aktif cüruf harçlarının basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur [24].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzemeler (Materials)

Geopolimer harç numunelerinin üretimi için Çayırhan Termik Santraline ait uçucu kül ve Karçimsa'ya ait yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan mineral esaslı bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel analizleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Uçucu kül (Çayırhan) [25] ve yüksek fırın cürufu (Karçimsa) kimyasal özellikleri (Fly ash (Çayırhan) and blast furnace slag (Karçimsa) chemical properties)

Bileşen(%)	Uçucu kül	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	50.98	33.48
Al ₂ O ₃	13.11	8.93
Fe ₂ O ₃	9.74	1.25
S+A+F	73.83	43.66
CaO	11.82	34.47
MgO	3.91	8.30
Na ₂ O	2.71	0.32
K ₂ O	1.91	0.84
SO ₃	3.94	0.83
K.K	0.86	-
Cl-	0.014	0.016

Tablo 2. Uçucu kül (Çayırhan) [25] ve yüksek fırın cürufu (Karçimsa) fiziksel özellikleri (Fly ash (Çayırhan) and blast furnace slag (Karcimsa) physical properties)

	Uçucu kül	Yüksek Fırın Cürufu
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.36	2.83
Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /g)	2754	4125

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH ve 2 modül Na₂SiO₃ solüsyonu karışımları kullanılmıştır. Kullanılan NaOH'in CAS No: 1310-73-2 olup kimyasal özellikleri Tablo 3'te

verilmiştir. Deney serilerinde standart CEN kumu ve Ankara şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 3. Sodyum hidroksit kimyasal özellikleri (Sodium hydroxide chemical properties)

NaOH	≥% 99.0
Na ₂ CO ₃	% 0.3
NaCl	% 0.02
Fe	15 ppm
SiO ₂	% 0.01
NaSO ₄	% 0.002
Molar Kütlesi	40 g/mol

2.2. Geopolimer Harçların Hazırlanması (Preparation of Geopolymer Mortars)

Geopolimer harç numunelerin hazırlanmasında alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ karışımları kullanılmış olup bağlayıcı olarak da yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışımlar oluşturulmuştur. 1 gün önceden laboratuvar ortamında hazırlanan NaOH solüsyonunun molaritesi 4M, 8M ve 12M olarak numune karışımlarına eklenmiştir ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 alınarak bütün serilerde sabit tutulmuştur. Tablo 4'te belirtilen NaOH katı haldeki ağırlığıdır. Geopolimer harçları sentezlemek için su/bağlayıcı oranı 0.40'ta sabit tutulurken aktivatör/bağlayıcı değişkenlik göstermektedir. Deney numuneleri TS EN 196-7'ye [26] uygun olarak her deney serisi için 3 adet numune 40x40x160 mm³ kalıplarda hazırlanmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler Şekil 2'de görüldüğü gibi fırın torbası içerisinde 12 saat süresince 50 °C, 75°C, 100°C etüvde kür uygulanmıştır. Karışım oranlarına ait çizelge tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Deney numuneleri (40mm*40mm*160mm) (Testing specimens (40mm*40mm*160mm))

Tablo 4. Geopolimer harç karışım oranları (Geopolymer mortar mixing ratios)

YFC (g)	UK (g)	Kum (g)	Molarite	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Su / Bağlayıcı	Su (g)	Na ₂ SiO ₃ / NaOH
450	0	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
225	225	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
0	450	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
450	0	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
225	225	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
0	450	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
450	0	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2
225	225	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2
0	450	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2

Isıl kür işleminin ardından aynı gün içinde oda sıcaklığına gelen 40x40x160 mm³ boyutundaki sertleşmiş numuneler Şekil 3'te görüldüğü gibi eğilmede çekme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e (2016) [27] göre belirlenmiştir. TS EN 196-1

standardında belirtilen deney yöntemleri doğrultusunda, harçların basınç dayanımı deneyinde yükleme hızı 2400 N/sn, eğilmede çekme dayanımı deneyinde ise yükleme hızı 50 N/sn olarak kullanılmıştır [27].



Şekil 3. Basınç ve eğilmede çekme deneyi, eğilme deneyi sonucu numuneler (Compressive and flexural tensile testing, appearance of specimens after flexural testing)

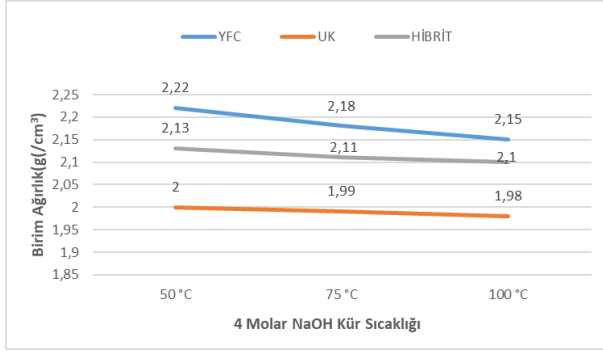
3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Birim Ağırlık (Unit Weight)

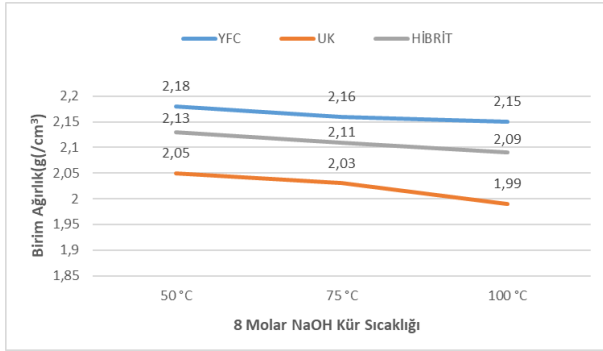
Geopolimer harç numunelerinin birim ağırlıkları, yapılan çalışma sonucunda 1,98-2,22 g/cm³ aralığında hesaplanmıştır. Yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer harçların uçucu kül içeren

geopolimer harçlardan daha yüksek birim ağırlıklara sahip olduğu görülmüştür. Bu farklılık, yüksek fırın cürufunun daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, geopolimer harçların birim ağırlıklarında çok çarpıcı farklılıklar gözlemlenmesinde daha yüksek

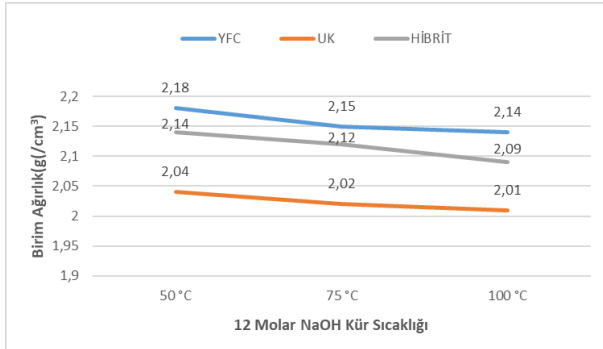
sıcaklıklarda uygulanan kürde bir miktar birim ağırlıklarda düşüş görülmüştür. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da, geopolimer harçların birim ağırlıkları verilmiştir.



Şekil 4. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



Şekil 5. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 6. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

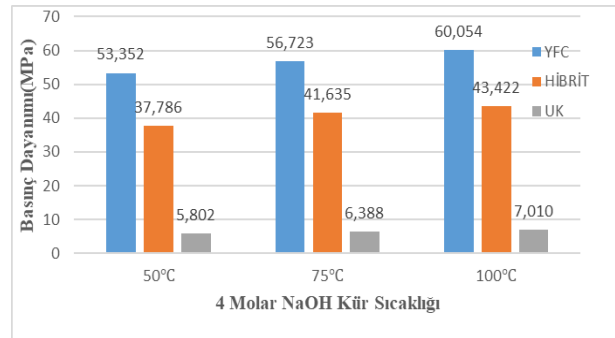
3.2. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Farklı molaritede, kür koşullarında ve farklı malzeme türlerine ait basınç dayanımları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 3,4,5 incelendiği zaman basınç dayanımı açısından en iyi sonuçlar yüksek fırın cürufu geopolimer harç için,

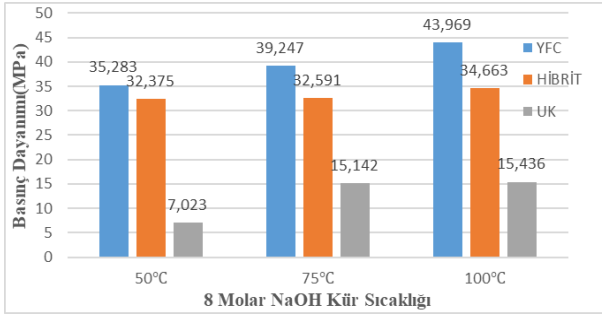
100 °C'de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 60,054 MPa, hibrit geopolimer harç için 100 °C'de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 43,422 MPa ve uçucu küllü geopolimer harç için 100 °C'de 8 molar NaOH konsantrasyonunda 15,436 MPa ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıkta ısıl kür ve düşük molariteli geopolimer harçlar basınç dayanımına olumlu katkılar sağlamıştır. Yaprak, H.; Kaplan, G yapmış oldukları araştırmada da benzer sonuçlar gözlemlenmiştir [28].

Düşük molariteli NaOH kullanımı, geopolimer harçların düşük porozite ve yüksek bağlanma gücüne sahip olmalarına ve dolayısıyla daha yüksek dayanıma sahip olmalarına yol açmaktadır. Bu durum, malzemenin mekanik özelliklerinin artırılması açısından önemlidir. Düşük molariteli NaOH kullanımı ayrıca daha düşük kür sıcaklıklarında bile yeterli reaksiyon hızını sağlar. Yüksek dayanımın ana nedeni, alüminosilikatik malzemenin, düşük molariteli NaOH kullanımıyla daha fazla oligomer oluşturmalarıdır. Yüksek molariteli NaOH kullanıldığında ise daha az oligomer oluşumu gerçekleşmektedir. Oligomerler, malzemenin sertleşmesinde önemli bir rol oynar ve yüksek dayanımı sağlar [29].

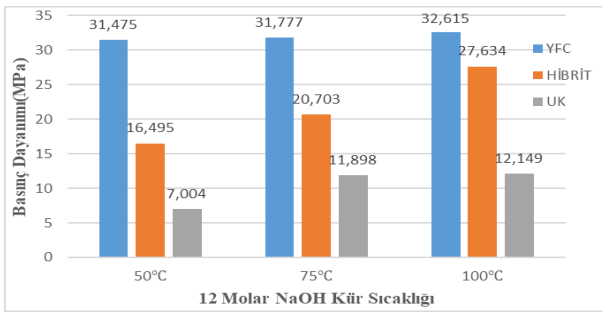
Yüksek fırın cürufu, uçucu küllü karşılaştırıldığında daha yüksek miktarda silika ve alüminyum oksit içerir. Bu nedenle, yüksek fırın cürufu içeren geopolimerler, daha fazla Si-O-Si ve Al-O-Al bağları oluşturabilirler, bu da daha güçlü bir yapı oluşturur. Ayrıca, yüksek fırın cürufu, uçucu küllü karşılaştırıldığında daha yüksek kalsiyum oksit içerir. Kalsiyum oksit, su ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit oluşturabilir, bu da geopolimerizasyon sürecini hızlandırır ve daha hızlı bir sertleşme sağlar. Bu faktörler, yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerlerin genellikle daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir [30-31].



Şekil 7. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



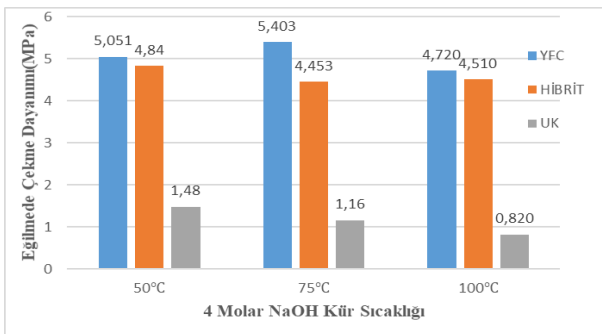
Şekil 8. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



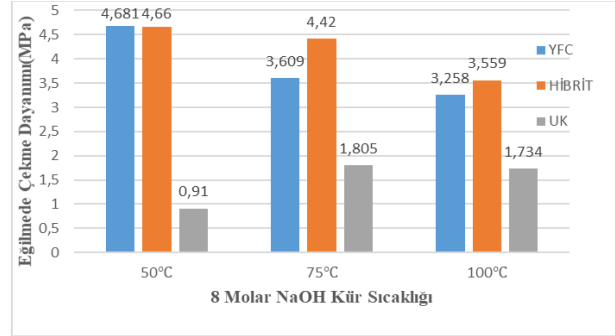
Şekil 9. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

3.3. Eğilmede Çekme Dayanımı (Flexural Tensile Strength)

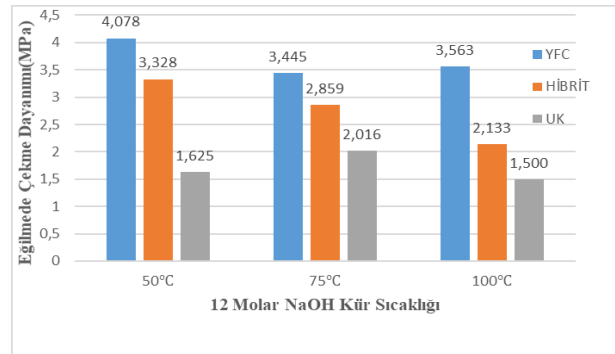
Farklı molaritede, kür koşullarında ve farklı malzeme türlerine ait eğilmede çekme dayanımları Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 6,7,8 incelendiği zaman eğilmede çekme dayanımı açısından en iyi sonuçlar yüksek fırın cürüflü geopolimer harç için, 75 °C’de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 5,403 MPa, hibrit geopolimer harç için 50 °C’de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 4,84 MPa ve uçucu küllü geopolimer harç için 75 °C’de 12 molar NaOH konsantrasyonunda 2,016 MPa ölçülmüştür.



Şekil 10. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



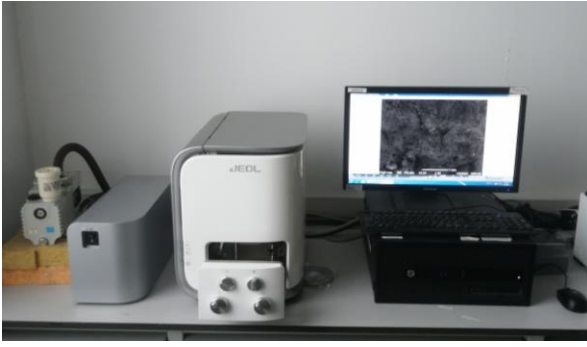
Şekil 11. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 12. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

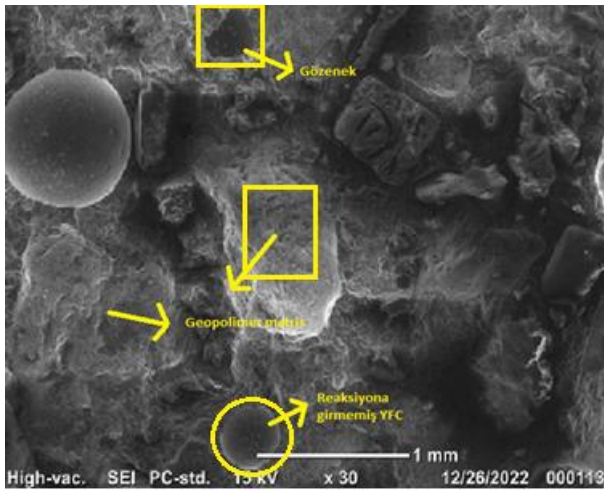
3.4. Mikroyapı Deneyi (Microstructure Analysis)

8 molar derişimlerle hazırlanan geopolimer harçların 100°C’de ısıl kür sonrasındaki mikroyapı analizleri (SEM) deneyi yapılmıştır. Ayrıca yüksek performans sağlayan 100°C’de ısıl kür uygulanmış 4 molar derişimli yüksek fırın cüruf katkılı geopolimer harcında mikroyapı analizi yapılmıştır. SEM analizleri Şekil 13’de görüldüğü gibi JEOL(JCM-6000) marka taramalı elektron mikroskopunda yapılmıştır. Uçucu kül içerikli geopolimer harçların, yüksek fırın cürufu ve hibrit içerikli geopolimer harçlara göre daha gözenekli yapıya sahip olduğu ve çukurların oluştuğu görülmüştür. Uçucu kül içerikli geopolimer harçlarda jel fazları belli bölgelerde oluştuğu ve diğer bölgelerde tepkimeye girmeyen uçucu kül tanelerinin olduğu ve jel fazlarının net olarak oluşmadığı görülmüştür [32].

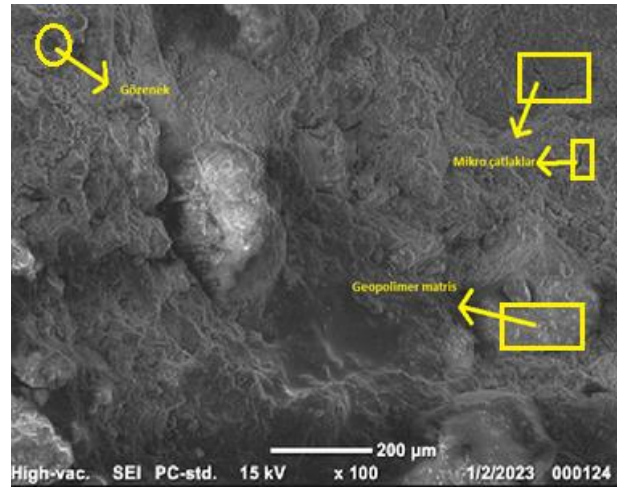


Şekil 13. JEOL Taramalı Elektron Mikroskobu (JEOL Scanning Electron Microscope)

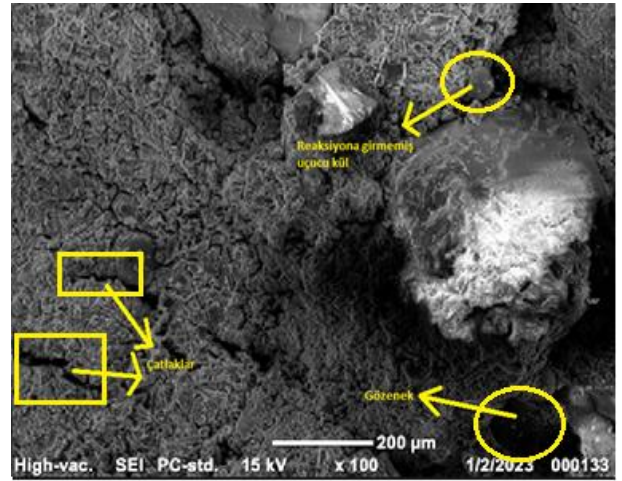
Şekil 14, 15, 16, 17’de yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit geopolimer harçlara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 14 ve Şekil 15’de yüksek fırın cürufuna ait geopolimer harçların SEM görüntülerinde daha az gözenek ve boşluklar oluşmuştur ve geopolimer matris oluşumu uçucu küle oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle yüksek fırın cürufu harçlarda mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 16’da Uçucu kül ait SEM görüntüsü incelendiğinde çatlakların, gözeneklerin ve tepkimeye girmemiş uçucu kül tanelerinin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca jel oluşumunun meydana geldiği ve bu jelin üzerinde çöken kalıntıların olduğu görülmüştür [32].



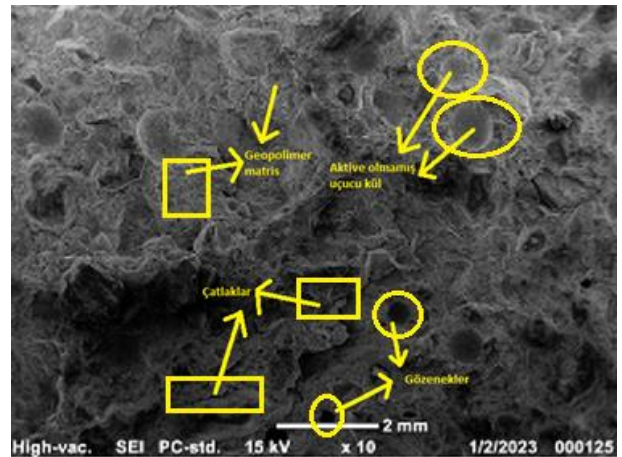
Şekil 14. 4 molar NaOH yüksek fırın cürufu geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of blast furnace slag based geopolimer mortar with 4 molar NaOH concentration)



Şekil 15. 8 molar NaOH yüksek fırın cürufu geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of blast furnace slag based geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 16. 8 molar NaOH uçucu küllü geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of fly ash based geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 17. 8 molar NaOH hibrit geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of hybrid geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışimli geopolimer harçların mekanik özellikleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

- Düşük molariteye sahip olan yüksek fırın cürufu ve hibrit geopolimer harç numunelerin daha yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımlara ulaştığı gözlemlenmiştir.
- Isıl kür uygulamasının ve kür sıcaklığının artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarının arttığı, ancak genel olarak eğilmede çekme dayanımlarında azalmaların tespit edildiği görülmüştür. Geopolimerlerin ısıl kür sırasında basınç dayanımının artması, polimerizasyon reaksiyonlarının ilerlemesi ve dolayısıyla daha sert bir yapı oluşmasından kaynaklanır. Ancak aynı süreçte, ısıl kürün yüksek sıcaklığı nedeniyle, harç içinde oluşabilecek mikro çatlaklar veya diğer yapısal kusurlar artar. Bu da eğilme ve çekme dayanımını azaltabilir. Yani, sıcaklık arttıkça, harçtaki polimerizasyon reaksiyonları daha hızlı ilerlerken, yapısal kusurlar da artar ve bu da eğilme ve çekme dayanımını düşürür [33].
- Bütün deney serilerinde yüksek fırın cürufu geopolimer harçların uçucu küllü geopolimer harçlara göre daha yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımlarına ulaşılmıştır. Yüksek fırın cürufu ve hibrit geopolimer harçlar ve betonlar taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılması uygun olacağı değerlendirilmektedir.
- Uçucu kül içerikli geopolimer harçlar düşük dayanımlar sağlamasına karşın hibrit geopolimer harçlar mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür. Bu kapsamda atık olarak elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu külün hibrit kullanımı uygun olacağı değerlendirilmektedir.
- Yüksek fırın cürufu ve hibrit karışimli geopolimer harçlar SEM analizlerinde uçucu küllü geopolimer harçlara göre geopolimer matrislerin yoğun bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir ve gözeneklerin daha az olduğu görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa KOP: Literatür taramasını, deneylerin yapımını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, conducting experiments, analyzing results, and paper composition.

Salih YAZICIOĞLU: Literatür taramasını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, analyzing results, and paper composition.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N.B. Singh, B. Middendorf Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview Construct. Build. Mater. 237 (2020), Article 117455.
- [2] I. Balcır, T. Korim, A. Dobrdi, Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers Understanding through variations of setting time, Constr. Build. Mater. 93 (2015) 983–988.
- [3] C. Un, J. Sanjayan, R. San Nicolas, J. van Deventer, Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams, Constr. Build. Mater. 94 (2015) 10–19.
- [4] P.K. Sarker, R. Haque, K.V. Ramgolam, Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete, Mater. Des. 44 (2013) 580–586.
- [5] F. Okoye, J. Durgaprasad, N. Singh, Mechanical properties of alkali activated fly ash/Kaolin based

- geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 685–691.
- [6] B. Joseph, G. Mathew, Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete, *Sci. Iran.* 19 (5) (2012) 1188–1194.
- [7] L.K. Turner, F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Constr. Build. Mater.* 43 (2013) 125–130.
- [8] C. Gunasekara, D.W. Law, S. Setunge, J.G. Sanjayan, Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 592–599.
- [9] P. Nuaklong, K. Janprasit, P. Jongvivatsakul Enhancement of strengths of high-calcium fly ash geopolymer containing borax with rice husk ash J. *Build. Eng.* (2021), Article 102762.
- [10] Lam, T. V., & Vu, K. D. Influence of NaOH-concentration and blast-furnace-slag on the properties of geopolymer mortars. *Magazine of Civil Engineering*, 115(7), (2022) 146–158.
- [11] Huseien G.F., Mirza J., Ismail M., Hussin M.W. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash *Construction and Building Materials*, (2016) 125 , pp. 1229-1240.
- [12] Tole I, Rajczakowska M, Humad A, Kothari A, Cwirzen A. Geopolymer Based on Mechanically Activated Air-cooled Blast Furnace Slag. *Materials* (Basel, Switzerland), (2020) 13(5).
- [13] Inti, S., Sharma, M. & Tandon, V. Influence of Curing on the Properties of Geopolymer Mortar Made with Low Molarity Sodium Hydroxide. *Transp. in Dev. Econ.* (2017) 3, 11.
- [14] Mohd Salahuddin, M.B.; Norkhairunnisa, M.; Mustapha, F. A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers. *Ceram. Int.* 41, (2015) 4273–4281.
- [15] J.L.Provis, Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Mater Struct*, 47(1-2)(2014) 11-25.
- [16] Bakri, A.M.; Kamarudin, H.; Binhussain, M.; Nizar, I.K.; Rafiza, A.R.; Zarina, Y. Comparison of Geopolymer Fly Ash and Ordinary Portland Cement to the Strength of Concrete. *Adv. Sci. Lett.*, 19, (2013) 3592–3595.
- [17] Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A.; Van Deventer, J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. *J. Mater. Sci.*, 42, (2007) 2917–2933.
- [18] Andini, S.; Cioffi, R.; Colangelo, F.; Grieco, T.; Montagnaro, F.; Santoro, L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Manag.* 28, (2008) 416–423.
- [19] Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., Sanz, J., Alkaline activation of fly ashes: a NMR study of the reaction products, *Journal of American Ceramics Society*, 87 (2004) 1141-1145.
- [20] Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindapasirt P., *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, (2016) 852p.
- [21] Coppola, L.; Bellezze, T.; Belli, A.; Bignozzi, M.C.; Bolzoni, F.; Brenna, A.; Cabrini, M.; Candamano, S.; Cappai, M.; Caputo, D.; et al. Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction—Part 1. *J. Appl. Biomater. Funct. Mater* 16, (2018) 186–202.
- [22] Chindapasirt, P. Challenge of Adopting Relatively Low Strength and Self-cured geopolymer for Road Construction Application: A Review and Primary Laboratory Study. *Int. J. Pavement. Eng.* (2019) 1–15.
- [23] Yazıcı, N; Karagöl, F; Examination of Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Based and Slag Added Geopolymer Concretes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), (2022) 1592 – 1606.
- [24] Nasr, D., Pakshir, A. H., & Ghayour, H, (2018). The Influence of Curing Conditions and Alkaline Activator Concentration on Elevated Temperature Behavior of Alkali Activated Slag (AAS) Mortars. *Construction and Building Materials* 190, (2018) 108–119.
- [25] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. Ve Yeğinobalı, A., Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2003.

[26] TS EN 196-7, "Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 7: Çimentodan Numune Alma ve Numune Hazırlama Yöntemleri", TSE, 2010.

[27] TS EN 196-1, 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, TSE-Turkey.

[28] Yaprak, H., & Kaplan, G., Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Tübvav Bilim Dergisi*, 9(3), (2016) 41-51.

[29] Ionescu BA, Chira M, Vermesan H, et al. Influence of Fe₂O₃, MgO and Molarity of NaOH Solution on the Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *MATERIALS*. (2022) 15(19):6965.


[30] Yaprak H, Alnkaa A, Memis, et al. Effects of different curing conditions on the properties of geopolymeric mortar. *MOJ Civil Eng.* 5(1), (2019) 45-50.

[31] Yilmazoglu, A, Yildirim, ST, Behçet, ÖF, Yıldız, S. Performance evaluation of fly ash and ground granulated blast furnace slag-based geopolymer concrete: A comparative study. *Structural Concrete*. (2022) 23: 3898– 3915.

[32] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator, *Cement and Concrete Research*, 35, (2016) 1984-1992.

[33] Mo, B. H., Zhu, H., Cui, X. M., He, Y., & Gong, S. Y. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, (2014) 144-148.

Investigation of Al 5754 Alloy in Warm Processing Conditions in Terms of Deep Drawability and Sheet Thickness Variation by Finite Element Method

Mehmet Emin ÇETİN^{1*} 

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Astronautical Engineering, Konya, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 02/08/2023
Accepted: 21/08/2023

Keywords

Warm Deep Drawing
AA5754-O
Temperature

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 02/08/2023
Kabul: 21/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ilık Derin Çekme
Al 5754-O
Sıcaklık

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of temperature, blank holder pressure, and punch speed on the deep drawability of Al 5754-O alloy were investigated numerically using the finite element method (FEM). / Bu çalışmada; sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği üzerindeki etkileri sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır.

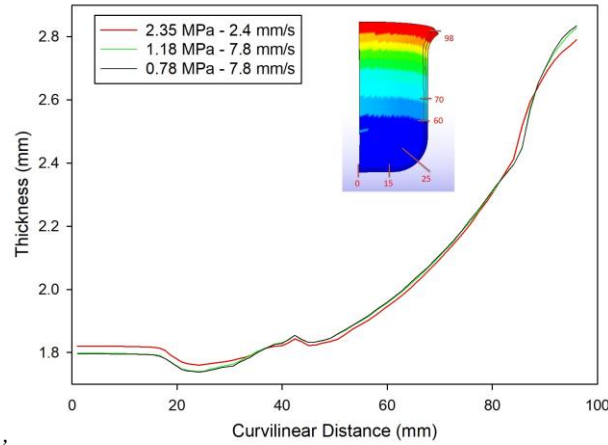


Figure A: Thickness variation graph for 300°C temperature / Şekil A.: 300°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği

Highlights (Önemli noktalar)

- Warm forming of AA5754 alloy / Al 5754 alaşımının ılık şekillendirilmesi.
- Deep drawability and sheet thickness variations / Derin çekilebilirlik ve sac kalınlığı değişimi
- The effect of temperature, blank holder pressure and punch speed / Sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının etkisi

Aim (Amaç): To investigate the effect of temperature, blank holder pressure, and punch speed on the warm deep drawability of AA 5754 alloy. / Sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754 alaşımının ılık derin çekilebilirliğine etkisini incelemek.

Originality (Özgünlük): Warm deep drawing analyses of AA 5754 alloy were performed numerically at 2 different punch speeds, 4 blank holder pressures, and 4 different temperatures. / Al 5754 alaşımının ılık derin çekme analizleri 2 farklı zımba hızında, 4 farklı baskı plakası basıncında ve 4 farklı sıcaklıkta sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): When all parameters are considered, it is determined that the most critical parameter affecting the sheet thickness variation is the punch speed. When analyses are examined which are conducted at 300 °C, it is concluded that the sheet thickness will decrease as the punch speed increases. / Tüm parametreler dikkate alındığında sac kalınlığı değişimini etkileyen en kritik parametrenin zımba hızı olduğu tespit edilmiştir. 300°C'de yapılan analizler incelendiğinde zımba hızı arttıkça sac kalınlığının azalacağı sonucuna varılmıştır.

Conclusion (Sonuç): Considering 300 °C temperature, 0.78 MPa blank holder pressure, and 7.8 mm/s punch speed parameters, the maximum cup height was obtained as 74.31 mm. / 300 °C sıcaklık, 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zımba hızı parametreleri göz önüne alınarak yapılan analizde maksimum kap yüksekliği 74,31 mm olarak elde edilmiştir.



Al 5754 Alaşımının Ilık İşlem Koşullarında Derin Çekilebilirliği ve Sac Kalınlık Değişimi Açısından Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Mehmet Emin ÇETİN^{1*}

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Astronautical Engineering, Konya, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 02/08/2023
Kabul: 21/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ilık Derin Çekme
Al 5754-O
Sac kalınlık

Öz

Alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirliği için ılık işlem koşulları büyük önem arz etmektedir. Yeniden kristalleşme altı sıcaklıklarda mikro yapıda değişim olmadan şekillendirilebilirlik artırılabilir. Bu çalışmada, Al 5754-O alaşımının ılık sıcaklıklarda şekillendirilmesine etki eden sıcaklık, işlem parametresi olarak kullanılarak derin çekme işlemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. AA5754-O alaşımının derin çekilebilirliği; 25°C'de tutulan zımba ile, 225 °C, 250 °C, 275°C ve 300°C'de kadar ısıtılmış kalıp koşullarında, 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa baskı plakası basınçlarında ve 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zımba hızlarında analizler yapılarak sıcaklığın, baskı plakası basıncının ve zımba hızının ılık derin çekilebilirliğe etkisi sac kalınlığı değişimi parametresi yoluyla araştırılmıştır. Analizlerde sıcaklık dağılımı, şekillendirme hızı ve baskı plakası basıncı parametrelerinin sac inceliği üzerine etkisi analiz edilmiştir. Yapılan analizler değerlendirilirken kusursuz derin kap çekilebilirliğini sağlayan parametreler incelenmiş ve şekillendirme hızı ve baskı plakası basıncı parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkileri analiz edilmiştir. 300 °C sıcaklık, 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zımba hızı koşulu için en büyük kap yüksekliği 74,31 mm olarak elde edilmiştir.

Investigation of Al 5754 Alloy in Warm Processing Conditions in Terms of Deep Drawability and Sheet Thickness Variation by Finite Element Method

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 02/08/2023
Accepted: 21/08/2023

Keywords

Warm Deep Drawing
AA5754-O
Temperature

Abstract

Warm forming conditions are of great importance for the formability of aluminum alloys. At sub-recrystallization temperatures, formability can be increased without changing the microstructure. In this study, the temperature affecting the shaping of the Al 5754-O alloy at warm temperatures was used as a process parameter and the macro deep drawing process was numerically investigated using the finite element method. The deep drawability of the AA5754-O alloy was investigated using the sheet thickness variation parameter, with punch held at 25°C, and die conditions heated up to 225 °C, 250 °C, 275°C and 300 °C. In addition, analyzes were made at 0.78 MPa, 1.18 MPa, 1.57 MPa, and 2.35 MPa pressure blank holder pressures and at punch speeds of 2.4 mm/s and 7.8 mm/s. In the analyses, the effects of temperature distribution, punch velocity, and blank holder pressure parameters on cup thinning were analyzed. While evaluating the analyzes, the parameters that ensure the perfect deep cup drawability were examined and the effects of punch velocity and blank holder pressure parameters on the formability were analyzed. The largest cup height was obtained as 74.31 mm for the condition of 300 °C temperature, 0.78 MPa blank holder pressure, and 7.8 mm/s punch speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir plastik şekil verme yöntemi olan derin çekme işleminde zımba mekanik hareket yaparak sac malzemeleri şekillendirir. Derin çekme imal usulünde kalıp yardımıyla düzlemsel geometri iki boyutlu saclardan belirli şekle ve derinliğe sahip üç boyutlu ürünler elde edilir [1]. Derin çekme işlemi tek kademede gerçekleştirilebileceği gibi birden

fazla kademede de gerçekleştirilebilir [2]. Endüstri uygulamalarında karmaşık veya basit şekle sahip birçok ürün kolaylıkla üretilebildiğinden derin çekme yöntemi önem arz etmektedir [3]. Dayanıklı ve hafif malzemelerin kullanımı otomotiv, havacılık ve uzay, denizcilik ve demiryolu sanayilerinde giderek artmaktadır [4]. Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri ile bu malzemelerden bir tanesidir [5], [6]. Jang vd. [7]

yaklaşık 8 µm tane boyutlarına sahip ticari 5182 ve 7075 alüminyum alaşımlı levhaların çekme deformasyon davranışını 423-723 K sıcaklık aralığında karşılaştırmışlardır. Eş eksenli tanelere sahip 5182 alüminyum alaşımı için ince uzun taneli 7075 alüminyum alaşımından daha büyük deformasyon hızı duyarlılık üssü değerleri elde edilmiştir. Xiao vd. [8] Al 7075 alaşımının yüksek sıcaklıklarda derin çekme simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve deneysel olarak analizlerin doğrulamasını yapmışlardır. Sıcak şekillendirme işleminde proses parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini incelemişler ve sıcak şekillendirme işleminin, soğuk şekillendirmeye kıyasla Al 7075'in şekillendirilebilirliğini önemli ölçüde artırabildiğini bulmuşlardır. Halkaci vd. [9] Al 5754 alaşımının derin çekme oranını sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini değiştirerek hidro mekanik derin çekme yöntemiyle artırmaya çalışmışlardır. Klasik derin çekme yönteminde 2 olarak belirledikleri sınır çekme oranını hidro mekanik derin çekme yöntemiyle 2,27'ye yükseltmişlerdir.

Al-Mg alaşımlarından biri olan Al 5754 alaşımı sahip olduğu yüksek mukavemet, yüksek süneklik, düşük yoğunluk ve iyi kaynak edilebilirlik özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [10], [11]. Al 5754 alaşımının oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği çelik saclara göre düşüktür. Fakat Al 5754 alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir değerde şekillendirebilirliği artmaktadır [12]. 25 °C sıcaklık koşulunda 5754 serisi alaşımların makro şekillendirilebilirlikleri deformasyon hızına duyarlı değilken 100 °C'nin üzerinde akma gerilmesinin görece düşmeye başlar ve deformasyon hızı duyarlılık üssü artar. Sıcaklığına artışı ile birlikte akma gerilmesindeki azalma 175 °C'nin üzerinde belirginleşir [13]. Metallerin ılık şekillendirilmelerinde işlem sıcaklığı değeri, şekil verilecek malzemenin erime sıcaklığının 0,3-0,5 katı arasındadır [14]. Bu sıcaklık değeri aralığında şekillendirilebilirlik malzemenin kayma bantlarını aktif hale getirilerek arttırılabilir [15]. Ek olarak bu aralığın maksimum sınırı yeniden kristalleşme sıcaklığı altında kaldığı için malzemede içyapı değişikliği oluşmadan şekillendirme yapılabilmektedir [2]. Laurent ve ark. [16] AA5754-O alüminyum alaşımının silindirik kalıpta derin çekilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının Al alaşımı için 350 °C ve altı sıcaklıklar olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Çalışmalarında kalıp sıcaklıkları için 250 °C ve üstü sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada da

analiz sıcaklıkları 225 °C, 250 °C, 275°C ve 300°C olarak belirlenmiştir. Bolt vd. çalışmalarında Al 5754 alaşımının derin çekilebilirliğini incelemiş ve sıcaklığın sağladığı pozitif etki ile derin çekme oranını %29,1 arttığını belirtmişlerdir [17]. Kaya vd. [18] AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilebilirliğini derin çekme oranı, sac kalınlığı değişimi ve yağlayıcı etkisi yönünden araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde AA5754-O malzemesi için 2,9 derin çekme oranına 300 °C sıcaklıkta ve 2,5 mm/s zımba hızında ulaşmışlardır. Derin çekme işlemi sırasında kap duvarlarındaki deformasyon kaynaklı gerilmeler sıcaklık artışı ile azalmaktadır [19]. Görüldüğü gibi literatürde birçok çalışmada Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilirliği sıcaklık ile artırılabilir. Derin çekme işleminde baskı plakası basıncı ve zımba hızı şekillendirilebilirliği etkileyen diğer faktörlerdendir [20]–[22].

Bu çalışmada; sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği üzerindeki etkileri sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Literatürden farklı olarak, zımba hızları 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s olarak belirlenmiş, baskı plakası basınçları 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa olarak verilmiş ve sayısal analizler 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. Seçilen bu işlem parametrelerinin derin çekilen kaplardaki sac kalınlığı değişimi üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada sac malzemede ılık mekanik derin çekme sonucunda oluşan kalınlık değişiminin belirlenmesi için 4 ayrı model sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Sonlu elemanlar analizi için LS-DYNA programı kullanılmıştır. Solidworks CAD programında derin çekme kalıp bileşenleri çizilmiştir. Kalıp bileşenleri Hyper-mesh programına aktarılmış ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sac malzemesi olarak Al 5754 alaşımı kullanılmıştır. SEM'in oluşturulmasında derin çekilecek malzemenin fiziksel davranışının malzeme modelini belirlemesi kritik öneme sahiptir. Johnson-Cook malzeme modeli metallerin yüksek şekil değiştirme hızları için uygun bir modeldir bu nedenle malzeme modeli olarak seçilmiştir. ılık derin çekme SEM'nin oluşturulmasında MAT-15 (izotropik, elastik-plastik) Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Al 5754 alaşımının temel mekanik

özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri literatürde Al 5754 alaşımı için yapılmış çalışmalardan [3], [23] alınmış ve Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Al 5754 alaşımının mekanik özellikleri (Mechanical properties of AA5754 alloy)

Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Kayma Modülü (GPa)	Poisson oranı
2700	70	26.9	0,33

Tablo 2. Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları [3], [23] (Constants of Johnson-Cook material model)

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
103,773	296,552	-0,003101	0,4368	1,24513	-0,2	1,133	-0,229	0,0897	7,979

Ilık derin çekme işleminin sonlu elemanlar modelinin (SEM) oluşturulması için gerekli geometrik şekiller zımba, sac, baskı plakası ve kalıptan oluşmaktadır. Tablo 3’te sayısal analizlerde kullanılan kalıp, sac, baskı plakası ve işlem sıcaklıklarına ait parametreler verilmiştir.

SEM’deki tüm parçalar Solidworks (Dassault, Fransa) programında yüzey olarak modellenmiştir. Daha sonra Hypermesh (Altair Engineering, Troy Michigan, ABD) programı kullanılarak yüzeylerin sonlu eleman ağ yapıları oluşturulmuştur.

Tablo 3. İşlem parametreleri (Process parameters)

İşlem Parametreleri	Değerler
Baskı plakası basıncı	0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 Mpa, 2,35 MPa
Sac çapı	150 mm
Zımba hızı	2,4 mm/s, 7,8 mm/s
Zımba çapı	65,21 mm
Zımba radyüsü	15 mm
Kalıp çapı	69,39 mm
Kalıp radyüsü	11,71 mm
Malzeme kalınlığı	2 mm
Ilık işlem sıcaklığı	225 °C, 250 °C, 275 °C, 300 °C,

SEM’de sac, kalıp, baskı plakası ve zımba kabuk (Shell) elemanlarla modellenmiştir. Sac malzeme için tam integrasyonlu dörtgen ve üçgen kabuk elemanlar (Element Type 16) kullanılmıştır. Derin çekme sayısal modelinde yer alan baskı plakası,

zımba ve kalıp için kalınlık boyunca 3 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay (Element Type 2) kabuk eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada modellerde kullanılan bileşenlerin her birinin eleman sayıları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Modellemede kullanılan sonlu eleman sayıları (Finite element numbers used in modeling)

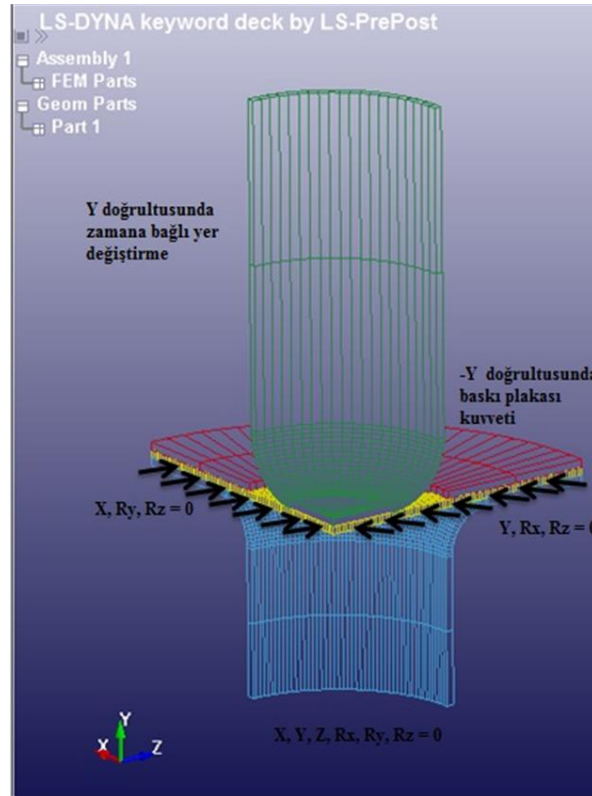
Parça Adı	Sac	Kalıp	Zımba	Baskı Plakası
Eleman Sayısı	5369	1200	460	50

LS-Dyna sonlu elaman analizi yazılımında çözüm yapmadan önce Ls-PrePost programı kullanılarak SEM modeli için gerekli malzeme parametreler, başlangıç ve sınır şartları tanımlanmıştır. Ilık derin çekme analizinde nümerik çözüm süresi göz önüne

alınarak aksel simetrik çeyrek model kullanılmıştır. Sacın y yönünde ötelenmesi, x ve z yönlerinde dönmesi sınırlandırılmıştır. Ek olarak sacın sınır şartları olarak y ve z yönlerinde dönmesi, x yönünde ötelenmesi sınırlandırılmıştır. Aynı

zamanda analizler gerçekleştirilirken baskı plakası, zımba ve kalıp rijit olarak modellenmiştir. Kalıbın ise bütün yönlerde serbestlik dereceleri sınırlandırılırken, zımba ve baskı plakasının y

ekseni doğrultusu dışındaki bütün serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır. Şekil 1’de analiz parametreleri ve sınır şartları verilmiştir.



Şekil 1. Ilık derin çekme analizinde kullanılan sınır şartları (Boundary conditions used in warm deep drawing analysis)

Sonlu eleman analizlerinde sac-zımba, sac-baskı plakası, sac-kalıp arasındaki temas bölgelerindeki sürtünme katsayıları sırasıyla 0,25, 0,05 ve 0,05 Coulomb sürtünme katsayıları tanımlanmıştır. Bütün temas yüzeyleri için LS-DYNA temas kartlarından “contact forming one way surface-to-surface” kartı kullanılmıştır. Ilık mekanik derin çekme işleminin sayısal modellenmesinde LS-DYNA programının 3 numaralı “diagonal scaled conjugate gradient iterative” algoritması ısı çözümü olarak kullanılmıştır. Ilık derin çekme işleminde model bileşenleri arasındaki ısı transferini modellemek için her bir malzemeye ve temas

algoritmasına atanan özellikler ayrı ayrı Tablo 5, 6, 7 ve 8’de verilmiştir. Zımbaya 25 °C sabit sıcaklık verilmiştir. Şekillendirme sıcaklığının derin çekilebilirliğe etkisini görmek için saca ve kalıba 225°C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklık değerleri atanmıştır. Zımba hızının derin çekilebilirliğe etkisini görmek için zımbaya 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s hızları verilmiştir. Ek olarak baskı plakası basıncının ılık derin çekme işlemine etkisini gözlemlemek için baskı plakası basıncı 2 mm sac kalınlığı için (-Y) yönünde 0,78 MPa, 1,57 MPa, 2,35 MPa ve 1.18 MPa olarak uygulanmıştır.

Tablo 5. Kalıp (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısı özellikler (Thermal properties of die (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)	Özgül Isı (J/Kg ² K)	Isıl Kapasite (J/°K)
38.95	473	12440

Tablo 6. Baskı plakası (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısı özellikler (Thermal properties of blank holder (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)	Özgül Isı (J/Kg ² K)	Isıl Kapasite (J/°K)
38.95	473	2385

Tablo 7. Zimba (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısıl özellikler (Thermal properties of punch (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ^{°K})	Özgül Isı (J/Kg ^{°K})	Isıl Kapasite (J/°K)
38.95	473	1183

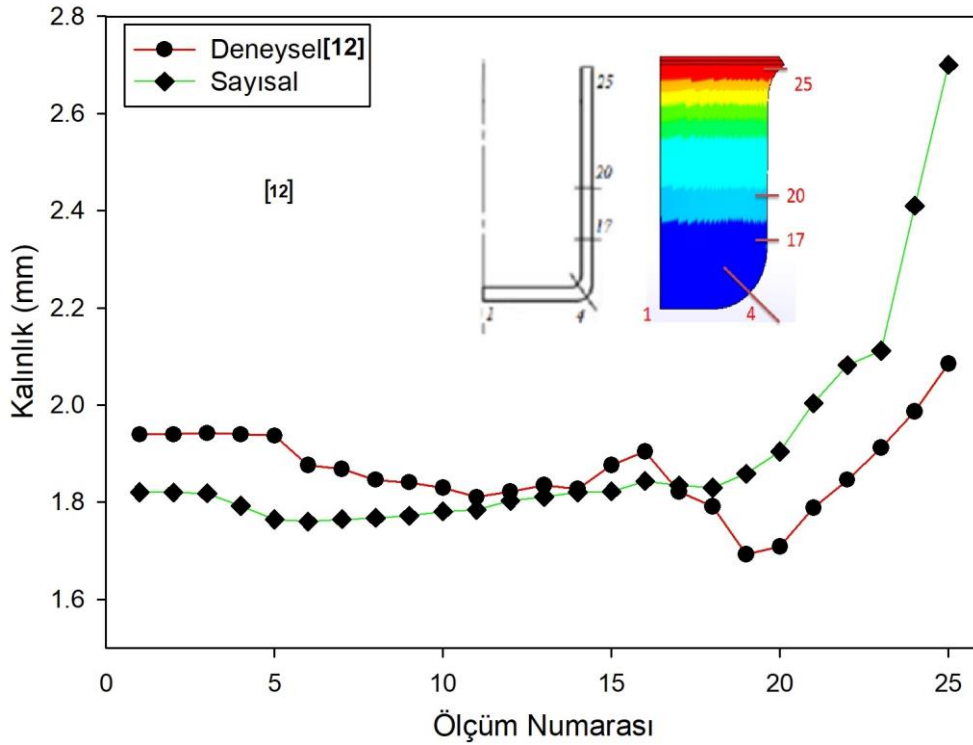
Tablo 8. Sac (Al 5754) için analizlerde kullanılan ısıl özellikler (Thermal properties of sheet (Al 5754) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ^{°K})	Özgül Isı (J/Kg ^{°K})	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°K)	Ergime Sıcaklığı (°K)
220	904	2.4x10 ⁻⁵	933

3. BULGULAR (RESULTS)

Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir çözüm olduğundan SEM'nin deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanması analizden elde edilen sonuçlar açısından önemlidir. SEM'nin doğrulanması 2,3 derin çekme oranında, 2,4 mm/s zimba hızında ve 2,35 MPa baskı plakası basıncında ve 300 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş derin çekme

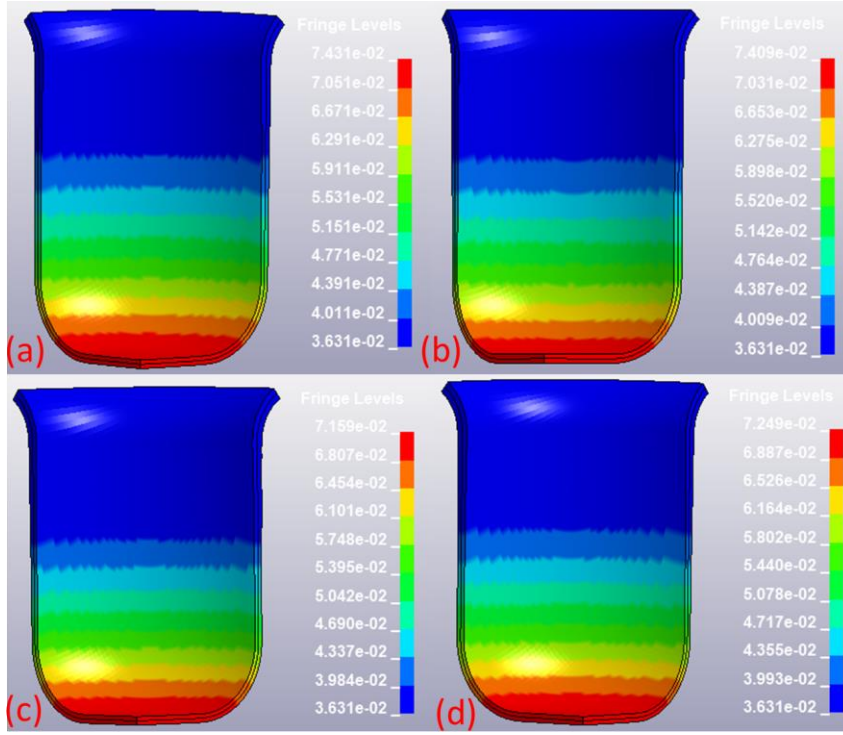
deneylerinden [12] elde edilen sac kalınlık verileri ile sayısal analizden elde edilen kalınlık verilerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Şekil 2'den görülebileceği üzere sayısal ve deneysel sonuçlar büyük ölçüde uyum göstermiştir. Bu durum SEM ile yapılan sayısal çözümün yakınsaklığını teyit etmektedir.



Şekil 2. Kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması (Comparison of thickness variations)

Şekil 3'te 300 °C sıcaklıkta 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa baskı plakası basınçlarında ve 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zimba hızlarında yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen ılık derin çekilen kap yükseklikleri gösterilmiştir. Şekil 3'te verilen maksimum ve minimum kap yüksekliği

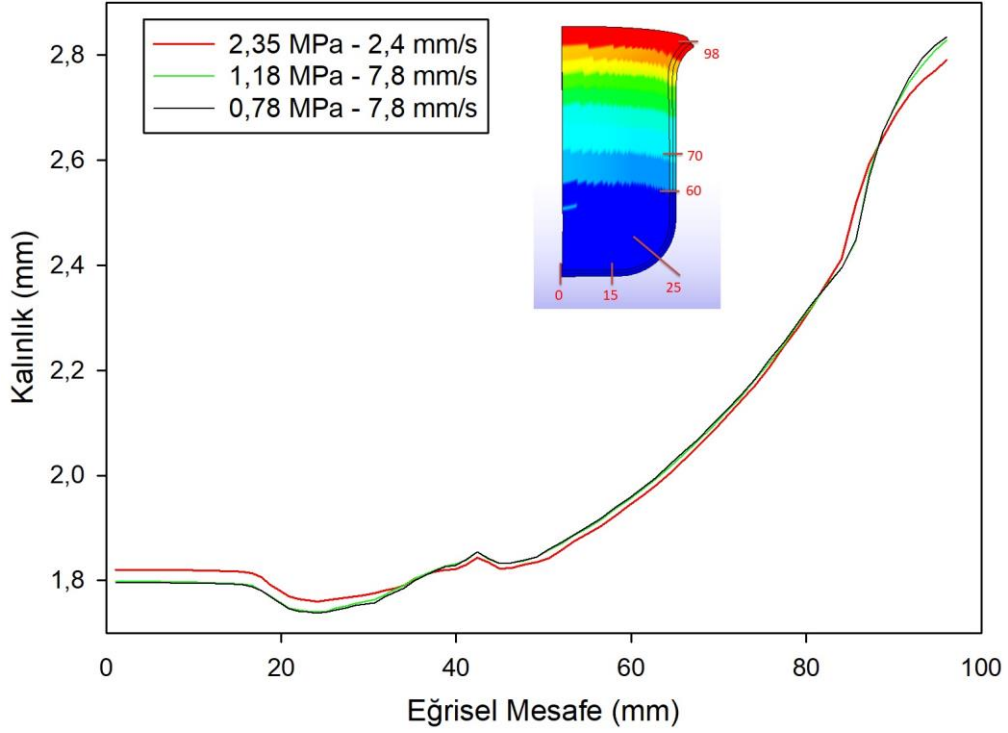
değerlerinin birimi LS-Dyna birim tercihi nedeniyle metre olarak gösterilmiştir. 4 farklı analiz sonucu incelendiğinde yırtılma ve marullanma olmadan elde edilen en büyük kap yüksekliği 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zimba hızı koşulu için 74,31 mm olarak elde edilmiştir.



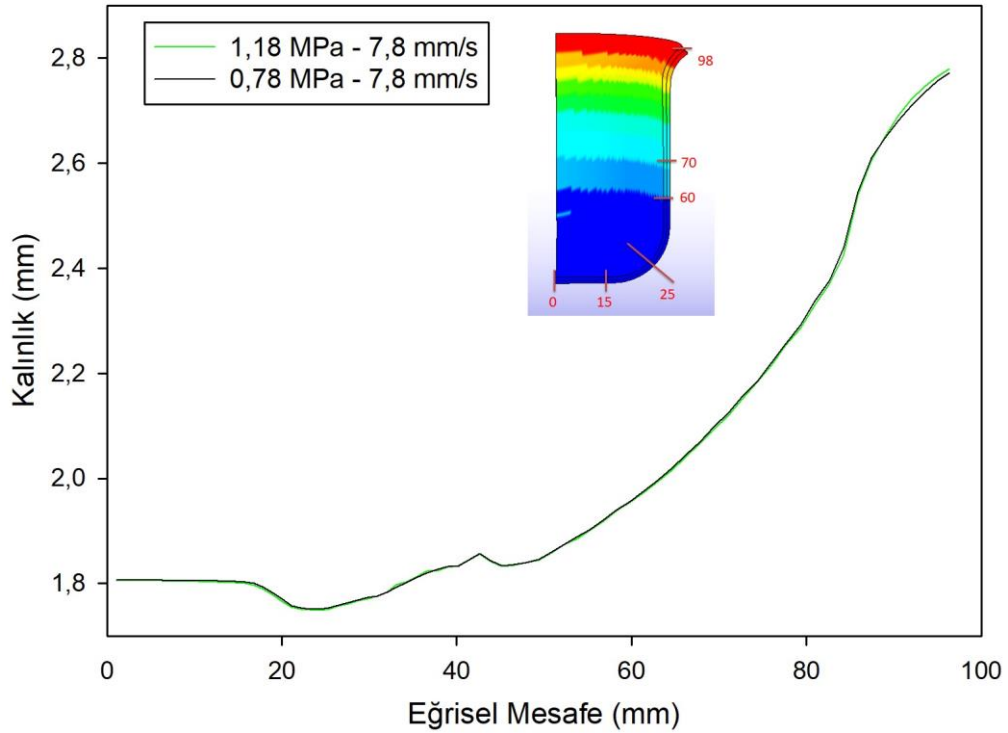
Şekil 3. 300 °C sıcaklık için kap yüksekliklerinin karşılaştırılması a) 0,78 MPa basınç ve 7,8 mm/s zımba hızı b) 1,18 MPa basınç ve 7,8 mm/s zımba hızı c) 1,57 MPa basınç ve 2,4 mm/s zımba hızı d) 2,35 MPa basınç ve 2,4 mm/s zımba hızı (Renk skalasındaki birim metre cinsindedir.) (Comparison of cup heights for 300 °C temperature a) 0.78 MPa pressure and 7.8 mm/s punch speed, b) 1.18 MPa pressure and 7.8 mm/s punch speed, c) 1.57 MPa pressure and 2.4 mm/s punch speed, d) 2.35 MPa pressure and 2.4 mm/s punch speed (Unit in fringe levels are meter.))

İlk derin çekme işleminde sac kalınlığı değişimine sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının etkisini görebilmek için 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklıklarda, 0.78, 1.18, 1.57 ve 2.35 MPa baskı plakası basınçlarında, 2,4 ve 7,8 mm/s zımba hızlarında SEA gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sac cidar kalınlığı değerleri Şekil 4,5,6 ve 7’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde sac kalınlığının zımba tabanından itibaren zımba radyüsüne yaklaştıkça azaldığı ve radyüs bounca incelenin devam ettiği, köşelerde ani incelemelerle birlikte köşelerden sonra boyun verme bölgesinin oluştuğu görülmüştür. Boyun verme bölgesini takiben derin çekilen sacın üst kısmına gidildikçe kalınlaşmaların arttığı anlaşılmıştır. Literatürde derin çekme işlemi sonrası saclarda zımba radyüsünde oluşan kalınlık azalma, çekilen kapların üst kısımlarında kalınlaşma ve boyunlaşma bölgeleri olduğu belirtilmiştir [24] ve elde edilen sac kalınlığı değişim literatür ile uyumludur. Demirci vd. [25] baskı plakası

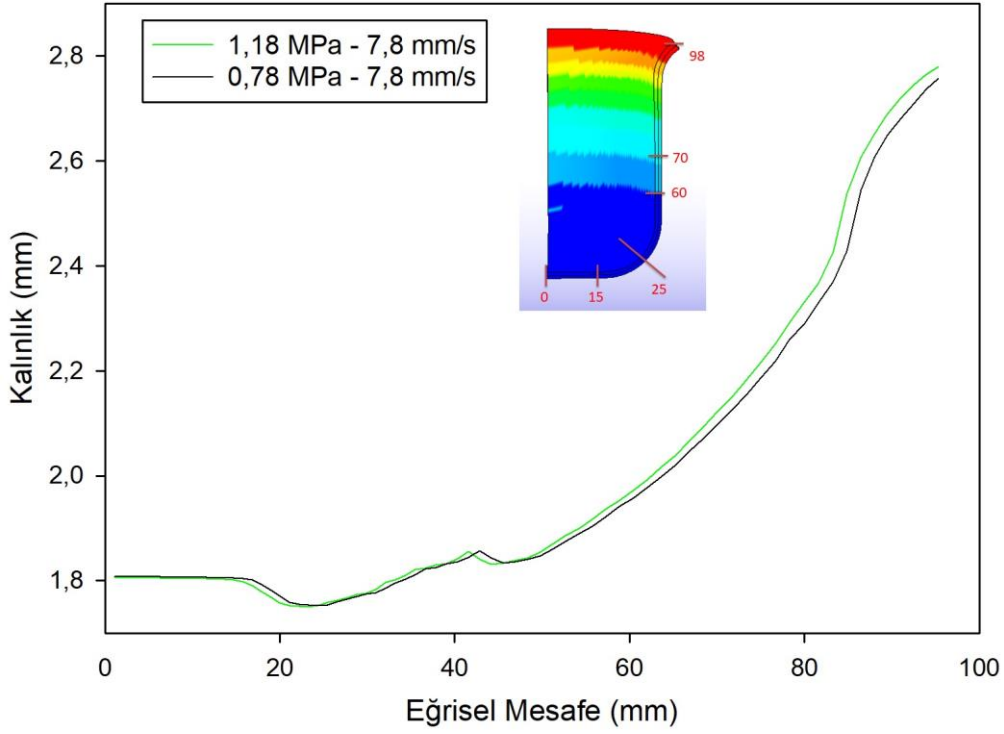
basıncının sac kalınlığına etkisini incelemiştir. Çalışmalarında değişen baskı plakası basınçlarının sac kalınlığı değişimi için anlamlı bir farklılığa yol açmadığını belirtmişlerdir. Zımba radyüsü bölgesi hariç diğer bölgelerde sac kalınlığı değişimi baskı plakası basıncı, zımba hızı ve sıcaklık değerlerinden yeteri kadar etkilenmemiştir. Bütün parametreler göz önüne alındığında sac kalınlığı değişimini etkileyen en önemli parametrenin zımba hızı olduğu belirlenmiştir. 300 °C yapılan analizler incelendiğinde zımba hızı arttıkça sac kalınlığının azalacağı sonucuna varılmıştır. Alüminyum alaşımları ılık şekillendirme sıcaklıklarında pozitif şekil değiştirme hassasiyetine sahiptir [26]. Zımba hızı arttıkça pozitif şekil değiştirme hassasiyetinin sebep olduğu boyunlaşma hatasının olma ihtimali artmaktadır. Sac kalınlığının düşmesi boyunlaşma kusuruna sebebiyet vermektedir. Buradan çıkan sonuçla sac kalınlığının değişimi üzerine en etkili parametre olarak zımba hızı belirlenmiştir.



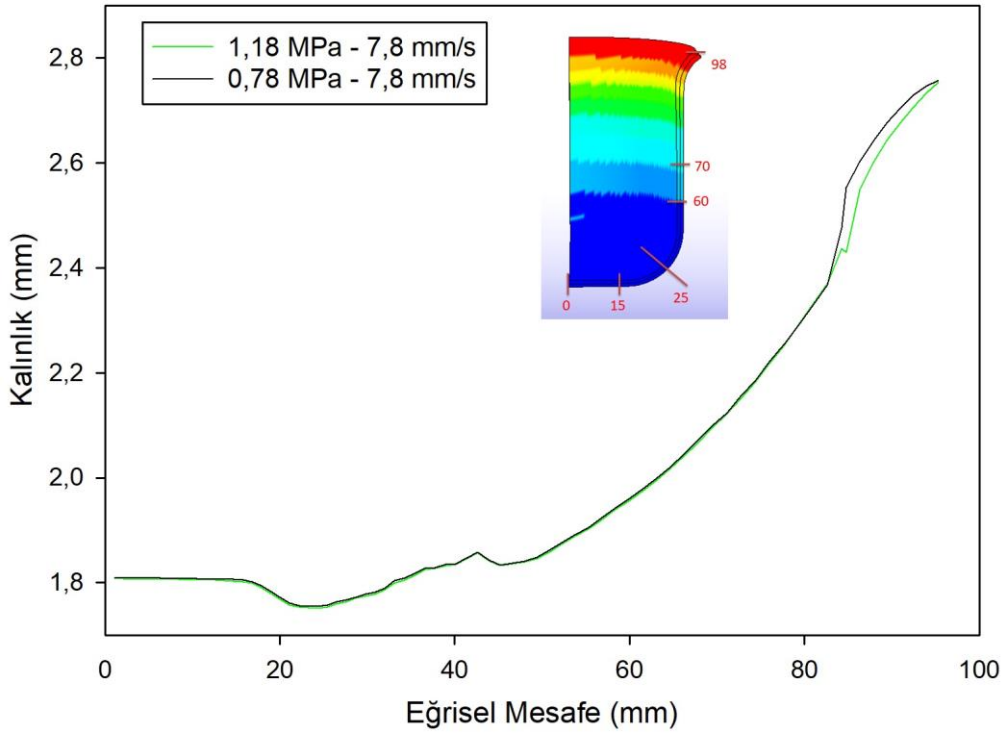
Şekil 4. 300°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 300°C temperature)



Şekil 5. 275°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 275°C temperature)



Şekil 6. 250°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 250°C temperature)



Şekil 7. 225°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 225°C temperature)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği 2,3 derin çekme oranında ılık şekillendirme sıcaklıklarında incelenmiştir. Ilık derin çekme işlemi için kapsamlı bir sayısal model hazırlanmıştır. SEM'ndeki temas algoritması, malzeme modeli ve kabuk elemanlar uyum

sağlamıştır. Giriş parametresi olarak sıcaklık, zımba hızı ve baskı plakası basıncı değerleri, çıkış parametresi olarak derin çekme kusurları ve cidar kalınlığı değişimi parametreleri incelenmiştir. Zımba sıcaklığı 25 °C olarak sabit alınmış, kalıp sıcaklığı ve sac sıcaklıkları analiz sıcaklığına göre 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C olarak değiştirilmiştir. Baskı plakası basıncı analizlerde

0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa olarak değiştirilmiştir. 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zımba hızlarında analizler yapılarak zımba hızının ılık derin çekilebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Bütün analizlerde saclar marullanma ve yırtılma kusuru olmadan başarıyla çekilmiştir. Maksimum şekillendirilebilirlik kalıp ve sac sıcaklığının 300 °C ve zımba sıcaklığının 25 °C olması halinde elde edilmiştir. Ek olarak 300 °C sıcaklıkta 74,31 mm değeri ile en yüksek kap yüksekliğinde derin çekme analizi yapılmıştır. Bu nedenle 300 °C sıcaklık en uygun ılık derin çekme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Zımba hızının elde edilen kaptaki incelmeye etki eden en önemli parametre olduğu saptanmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet Emin ÇETİN: Analizleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He performed the analysis, 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] G. Palumbo and L. Tricarico, "Numerical and experimental investigations on the Warm Deep Drawing process of circular aluminum alloy specimens," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 115–123, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.024.
- [2] M. H. Cetin, A. Ugur, O. Yigit, H. Gokkaya, and E. Arcaklioglu, "Development of Forming Temperature Curves for Warm Deep Drawing Process Under Non-isothermal Conditions," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 9, pp. 2763–2784, 2015, doi: 10.1007/s13369-015-1756-0.
- [3] D. Acar, M. Turkoz, H. Gedikli, H. S. Halkaci, and O. N. Cora, "Warm Hydromechanical Deep Drawing of AA 5754-O and Optimization of Process Parameters," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 140, no. 1, 2018, doi: 10.1115/1.4037524.
- [4] H. Gedikli, Ö. N. Cora, and M. Koç, "Comparative investigations on numerical modeling for warm hydroforming of AA5754-O aluminum sheet alloy," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 2650–2662, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.025.
- [5] E. Öztürk, M. Türköz, H. S. Halkacı, and M. Koç, "Determination of optimal loading profiles in hydromechanical deep drawing process using integrated adaptive finite element analysis and fuzzy control approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9–12, pp. 2443–2459, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8912-x.
- [6] G. Altuntaş and B. Bostan, "Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment," *Kov. Mater.*, vol. 60, no. 4, pp. 209–222, 2022, doi: 10.31577/km.2022.4.209.
- [7] D. H. Jang and W. J. Kim, "Warm Temperature Deformation Behavior and Processing Maps of 5182 and 7075 Aluminum Alloy Sheets with Fine Grains," *Met. Mater. Int.*, vol. 24, no. 3, pp. 455–463, 2018, doi: 10.1007/s12540-018-0061-3.
- [8] W. C. Xiao, B. Y. Wang, Y. Kang, W. P. Ma, and X. F. Tang, "Deep drawing of aluminum alloy 7075 using hot stamping," *Rare Met.*, vol. 36, no. 6, pp. 485–493, 2017, doi: 10.1007/s12598-017-0919-4.
- [9] M. Halkaci, M. Türköz, M. Dilmeç, S. Halkaci, and B. Dağhan, "Increasing the limiting drawing ratio of AA 5754 aluminum sheet by hydromechanical deep drawing process," *Proc. 10th Int. Conf. Technol. Plast. ICTP 2011*, no. November 2017, pp. 472–476, 2011.
- [10] H. Laurent, R. Greze, M. C. Oliveira, L. F. Menezes, P. Y. Manach, and J. L. Alves, "Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 46, no. 9, pp. 751–759, 2010, doi: 10.1016/j.finel.2010.04.004.

- [11] M. Ciemiorek, A. Ambroziak, K. Majchrowicz, M. Lewandowska, and J. Goliński, "Ductility and formability of ultrafine-grained 5754 aluminium alloy under various strain rates and temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 848, no. May, pp. 0–7, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.143375.
- [12] M. H. Çetin, "İlık Derin Çekme Prosesi İçin Şekillendirme Sıcaklıklarının Belirlenmesi Ve Karakterizasyonu," *Karabük Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2015.
- [13] A. H. van den Boogaard and J. Huétink, "Simulation of aluminium sheet forming at elevated temperatures," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 195, no. 48–49, pp. 6691–6709, 2006, doi: 10.1016/j.cma.2005.05.054.
- [14] H. S. Kim, M. Koç, and J. Ni, "Determination of proper temperature distribution for warm forming of aluminum sheet materials," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 128, no. 3, pp. 622–633, 2006, doi: 10.1115/1.2162913.
- [15] D. Ghaffari Tari, M. J. Worswick, and S. Winkler, "Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 8, pp. 1337–1347, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.028.
- [16] H. Laurent, J. Coër, P. Y. Manach, M. C. Oliveira, and L. F. Menezes, "Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 93, pp. 59–72, 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.01.009.
- [17] P. J. Bolt, N. A. P. M. Lamboo, and P. J. C. M. Rozier, "Feasibility of warm drawing of aluminium products," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 115, no. 1, pp. 118–121, 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00743-9.
- [18] S. Kaya, G. Spampinato, and T. Altan, "An Experimental Study on Nonisothermal Deep Drawing Process Using Aluminum and Magnesium Alloys," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 130, no. 6, Dec. 2008, doi: 10.1115/1.2975228.
- [19] A. Vasco *et al.*, "Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering in Production Systems Speciality," 2012.
- [20] Q. F. Chang, D. Y. Li, Y. H. Peng, and X. Q. Zeng, "Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 436–443, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.013.
- [21] O. Çavuşoğlu and H. Gürün, "Deformasyon hizinin DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 29, no. 4, pp. 777–784, 2014, doi: 10.17341/gummfd.76140.
- [22] E. ESENER, E. SÖNMEZ, and M. FIRAT, "Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–89, 2018, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.319383.
- [23] M. Rodriguez-Millan, D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek, and A. Arias, "Influence of stress state on the mechanical impact and deformation behaviors of aluminum alloys," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 7, 2018, doi: 10.3390/met8070520.
- [24] M. Colgan and J. Monaghan, "Deep drawing process: Analysis and experiment," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 35–41, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00253-4.
- [25] H. Ibrahim Demirci, M. Yaşar, K. Demiray, and M. Karali, "The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 2, pp. 526–532, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.01.008.
- [26] D. Li and A. Ghosh, "Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 352, no. 1–2, pp. 279–286, 2003, doi: 10.1016/S0921-5093(02)00915-2.

Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Performansının Enerji Tüketimine Etkilerinin İncelenmesi

Yaren GÜVEN^{1*}  Mustafa AKTAŞ¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 21/08/2023
Kabul: 01/09/2023

Anahtar Kelimeler

Havalandırma
İç hava kalitesi
Metro
Hava kirlenmeleri

Article Info

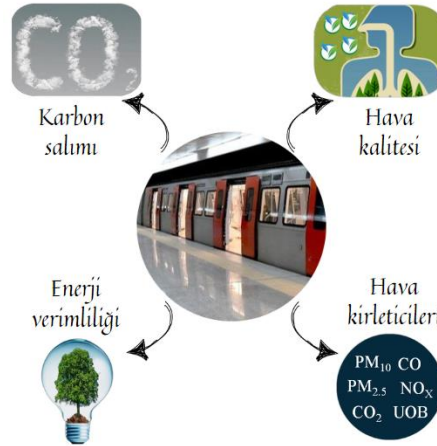
Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 21/08/2023
Accepted: 01/09/2023

Keywords

Ventilation
Indoor air quality
Subway
Air pollutants

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada bir metro istasyonunda havalandırma sisteminin nasıl çalıştığı, metro ortamındaki kirlenmeler, havalandırma sisteminin tükettiği enerjiye etki eden faktörler incelenmiştir. Enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. / In this study, how the ventilation system works in a subway station, the pollutants in the subway environment, the factors affecting the energy consumed by the ventilation system are examined. Methods that can improve the indoor air quality in the environment by using energy more efficiently were proposed.



Şekil A: Çalışmanın şematik çıktıları / Figure A: Schematic outputs of the study

Önemli Noktalar (Highlights)

- İyileştirilmiş enerji verimliliği ile karbon emisyonları azaltılarak iklim değişikliği hafifletilecektir. / Climate change will be mitigated by reducing greenhouse gas emissions through improved energy efficiency.
- İç hava kalitesindeki iyileşmeye bağlı olarak yolcu ve personel konforu artacaktır. / Passenger and staff comfort will increase due to improvement in indoor air quality.
- Enerjinin verimli kullanılması sağlanarak maliyetler düşürülecektir. / Costs will be reduced by ensuring efficient use of energy.

Amaç (Aim): Havalandırma sisteminin tükettiği enerjinin ve metro ortamındaki kirlenme konsantrasyonlarının azaltılarak iç hava kalitesinin iyileştirilmesi enerji tasarrufu sağlanması amacıyla önerilerde bulunulmuştur. / Recommendations were made to improve indoor air quality and save energy by reducing the energy consumed by the ventilation system and pollutant concentrations in the subway environment.

Özgünlük (Originality): Metro sistemlerinde kullanılacak yeni teknolojiler önerilmiştir. / New technologies that can be used in metro systems have been proposed.

Bulgular (Results): Bir havalandırma sisteminde fanların, elektrik motorlarının, CO₂ miktarının ve havalandırma ekipmanlarındaki kirliliğin enerji tüketimini etkilediği saptanmıştır. / It was found that fans, electric motors, the amount of CO₂ and pollution in the ventilation equipment affect the energy consumption in a ventilation system.

Sonuç (Conclusion): Hareketli CO₂ sensörü ile kontrol, partikül madde sensörü ile kontrol, toz toplayıcı sistemler ile daha etkin filtrasyon, aktif karbon ve zeolit kullanımı gibi enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. / Methods that can improve indoor air quality by using energy more efficiently, such as control with a moving CO₂ sensor, control with a particulate matter sensor, more efficient filtration with dust collector systems and the use of activated carbon and zeolite were proposed.



Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Performansının Enerji Tüketimine Etkilerinin İncelenmesi

Yaren GÜVEN^{1*} Mustafa AKTAŞ¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 21/08/2023
Kabul: 01/09/2023

Anahtar Kelimeler

Havalandırma
İç hava kalitesi
Metro
Hava kirleticileri

Öz

Büyük şehirlerde artan trafik yoğunluğu, bir ulaşım aracı olarak metro kullanımını arttırmaktadır. Her gün binlerce kişi ulaşımını metro kullanarak sağlamaktadır. Ancak metro ortamı partikül madde, karbondioksit, uçucu organik bileşikler ve kötü kokular başta olmak üzere birçok kirleticiyi barındırmaktadır. Bu kirleticilere maruz kalmanın uzun vadede birçok sağlık sorununa yol açacağı yapılan çalışmalar sonucunda kanıtlanmıştır. Metro istasyonlarında kirletici seviyelerini azaltarak yolcu ve personel konforunu sağlamak amacıyla havalandırma ve iklimlendirme sistemine gerek duyulur. Havalandırma sistemleri, metro ortamında sağlıklı bir iç hava kalitesi yaratırken büyük ölçüde enerji tüketen sistemlerdir. Fanlar, elektrik motorları, karbondioksit miktarı ve diğer ekipmanlarda oluşan kirlilik faktörü havalandırma sistemlerinin tükettiği enerjiye etki etmektedir. Bir ortamın sağlıklı iç hava kalitesine sahip olması, havalandırma sisteminin yeterli performans gösterdiği anlamına gelmektedir. Verimli havalandırma sistemlerinin tasarlanmasıyla ortamda yeterli iç hava kalitesi sağlanırken havalandırma sisteminin enerji tüketimi de azaltılabilir. Bu çalışmada bir metro istasyonunda havalandırma sisteminin nasıl çalıştığı, metro ortamdaki kirleticiler, havalandırma sisteminin tükettiği enerjiye etki eden faktörler incelenmiştir. Enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. Hareketli CO₂ sensörü ile kontrol, partikül madde sensörü ile kontrol, toz toplayıcı sistemler ile daha etkin filtrasyon, aktif karbon ve zeolit kullanımı önerilen yöntemlerden bazıları olabilir.

Investigation of the Effects of Ventilation Performance on Energy Consumption in Subway Stations and Tunnels

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 21/08/2023
Accepted: 01/09/2023

Keywords

Ventilation
Indoor air quality
Subway
Air pollutants

Abstract

Increasing traffic density in big cities, increases the using subway as a means of transportation. Every day, thousands of people provide their transportation with using subways. However, the subway environment contains many pollutants especially particulate matter, carbon dioxide, volatile organic compounds and bad smells. It was proven as a result of studies that exposure to these pollutants will cause many health problems in the long run. In order to reduce pollutant levels in subway stations and provide passenger and personnel comfort, ventilation and air conditioning systems are needed. Ventilation systems are systems that consume a great deal of energy while creating a healthy indoor air quality in the subway environment. Fans, electric motors, the amount of carbon dioxide and the pollution factor in other equipment affect the energy consumed by ventilation systems. The fact that an environment has a healthy indoor air quality means that the ventilation system performs adequately. By designing efficient ventilation systems, the energy consumption of the ventilation system can be reduced while providing adequate indoor air quality in the environment. In this study, how the ventilation system works in a subway station, the pollutants in the subway environment, the factors affecting the energy consumed by the ventilation system are examined. Methods that can improve the indoor air quality in the environment by using energy more efficiently were proposed. Control with movable CO₂ sensor, control with particulate matter sensor, more efficient filtration with dust collector systems, use of activated carbon and zeolite can be some of the recommended methods.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metro istasyon ve tünelleri pek çok zararlı kirleticiye ev sahipliği yapmaktadır. Yolcuların ve personellerin bu kirleticilere maruz kalması çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Zararlı kirletici konsantrasyonlarını azaltarak sağlıklı bir hava kalitesi sağlamak için havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Ancak havalandırma sistemleri sahip oldukları yüksek fan güçleri ve uzun çalışma süreleri sebebiyle yüksek enerji tüketen sistemlerdir. Uygun havalandırma sistemleri ile sağlıklı bir iç hava kalitesi sağlanırken aynı zamanda enerji tüketimi de azaltılabilir.

Bu çalışmanın amaçları şu şekilde özetlenebilir;

- Metro ortamındaki kirletici konsantrasyonlarını azaltarak iç hava kalitesinde iyileşme sağlamak,
- İç hava kalitesinde sağlanan iyileşmeye bağlı olarak yolcuların ve personellerin kirletici maruziyetini azaltmak ve konfor sağlamak,
- Yüksek enerji tüketen havalandırma sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak,
- Yüksek enerji tüketiminden kaynaklanan yüksek maliyetleri ve karbon salımını düşürmek,
- Enerji verimli havalandırma sistemlerinin önemi konusunda farkındalık yaratmak.

Bu çalışmada, metro istasyon ve tünellerinde hava kalitesi ve havalandırma kaynaklı enerji verimliliği konularında bilgiler sunulurken, enerji verimliliği ve iç hava kalitesiyle ilgili kriterlerin minimum enerji tüketimiyle sağlanmasına yönelik çalışmalar yapan araştırmacılara ışık tutacak nitelikte bilgiler sunulması ve yeni yaklaşımlar ortaya konulması hedeflenmiştir.

Üser vd. [1], bir fabrikada kullanılan motorların enerji ve güç kayıplarını inceleyerek standart bir motorun yüksek verimli bir motor ile değiştirilmesi durumunda tasarruf edilebilecek enerji miktarını ve maddi tasarrufu hesaplamışlardır. Ancak bu hesaplar tüm standart motorların yüksek verimli motorlarla hemen değiştirilmesi durumunda geçerlidir ve bu pratikte mümkün değildir. Çünkü ortalama standart elektrik motorlarının ömrü 12 yıldır ve tüm motorları aynı anda değiştirmek mümkün değildir. Bu sebeple ekonomik ömrünü tamamlayan motorların yüksek verimli motorlarla değiştirilmesinin daha mantıklı olduğu kanısına varmışlardır. Fabrika için elde ettikleri sonuçlarda motorların tam yüke yakın değerlerde çalışmadığı

ve motor kayıplarının fazla olması sebebiyle motorların değiştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Kim ve Kim [2], bir metro tüneline havalandırma bacasının konumunun havalandırma performansına etkisini incelemişlerdir. Gerçek bir metro tüneline 1/20 ölçeğinde olan bir model tünel inşa ederek model tünelde 4 farklı havalandırma bacasının konumuna göre havalandırma performansını değerlendirmişlerdir. 1. shaft trenin durduğu noktada trenin hemen arkasındadır. 2. shaft trenin yavaşlamaya başladığı konumdadır. 3. shaft 2. shafttan uzağa, 4. shaft ise 3. shafttan uzağa yerleştirilmiştir. Shaftın amaçlarından biri de tren rüzgarının yolcuların rahatsızlığını azaltmak için istasyona hava akışını azaltmaktır. Bu nedenle shaft istasyona en yakın yere yerleştirilmelidir. İstasyona en uzak olan 4. shaft debi miktarını maksimize ederek tren shafta ulaşana kadar istasyondan geçen miktarı en düşük seviyede tutmuştur. İstasyona en yakın olan 1. shaft, tren shafttan geçerken istasyona doğru tren rüzgarının miktarını en aza indirmiştir. Bu çalışmada en uygun konum 3. shaftın bulunduğu konum olduğunu ve burada verimliliğin 1. shafta göre %7,3 arttığını gözlemlemişlerdir. Moreno vd. [3], istasyon tasarımının ve piston etkisinin platformlarda hava kalitesini ne derece etkilediğini, enerji tüketimini ve yolcu konforu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Zorunlu mekanik tünel havalandırması ile çalışan on istasyon için alınan ortalama partikül madde konsantrasyonlarını $PM_{10}=50\mu g/m^3$, $PM_3=124\mu g/m^3$, $PM_{10}=59\mu g/m^3$ olarak ölçmüşlerdir. Bu değerler havalandırma kapatıldığında yükselmiştir. Platform boyunca en büyük partikül madde birikimi platformun ucunda meydana gelmiştir. Yolcu erişim tünellerinin dışarıdan temiz hava getirerek platformun partikül madde konsantrasyonunu seyretebileceğini söylemişlerdir. On platformda ölçtükleri ortalama CO_2 seviyesi 371-569 ppm aralığında olup birbirini takip eden trenlerle meydana gelen yolcu birikmesi nedeniyle CO_2 seviyesi yükselmiştir. Tek hatlı tünellere sahip dar platformların zorunlu tünel havalandırmasına bağımlı olduğu ve partikül madde konsantrasyonunu azaltmak için piston etkisinin tek başına yeterli olmadığına ulaşılmıştır. Çift hatlı geniş tünele sahip istasyonlardaki partikül madde seviyelerinin tünel havalandırması kapatıldığında büyük ölçüde etkilenmediğini ve hava kalitesi bozulmadan enerji tasarrufu sağlanmış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chatterjee vd. [4], yer altı madenlerindeki havalandırma fanlarına değişken hızlı sürücüleri uygulayarak minimum enerji maliyeti sağlayan optimum fan hızını belirlemek amacıyla bir optimizasyon modeli oluşturmuşlardır. Enerji verimliliği ve yük yönetimi olmak üzere iki

stratejiyi fan kanunlarına uygun olacak şekilde analiz ederek modellemiştir. Enerji verimliliği yaklaşımında değişken hızlı sürücülerini kullanarak fanı her zaman tam kapasitede değil, talebe bağlı çalıştırıp değişken hava akışına izin vererek elektrik tüketimini azaltmayı amaçlamışlardır. Yük yönetimi yaklaşımında kullanım süresi tarifesine göre madencilik sezonunu minimum maliyete yol açan optimum başlangıç zamanı bulunarak fan hızı ayarlanır. Elde ettikleri sonuçlara göre hızın sabit tutulması günlük 11.499 kWh enerji tüketimine yol açarken, hız değiştirildiğinde enerji tüketimi günlük 4.540 kWh olmuştur. Bu da günlük 6.959 kWh, yıllık 2.540.035 kWh enerji tasarrufu anlamına gelmektedir. Branşman direnci, fan özellikleri, debi gereksinimi gibi faktörlerin bu değerleri etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Quan vd. [5], metro istasyonu havalandırma sistemlerinin değişken hızlı çalışmasını sağlayan invertörlü ve yüksek verimli motorların kullanılmasını önermişlerdir. Değişken hızlı çalışma olarak önerdikleri sistemde IE2 sınıfı motor yerine IE4 sınıfı senkron relüktans motoru kullanmışlardır. Maliyetten tasarruf etmek amacıyla önceki sistemin fanlarını ve kanallarını kullanmışlar, sadece motorları değiştirmiş ve yeni invertörler takmışlardır. Ayrıca önerdikleri sisteme hava kalitesinin izlenmesine yönelik sensörler de yerleştirmişlerdir. Mevcut sistemin enerji tüketim miktarı 353.225,80 kWh, yıllık enerji maliyeti ise 25.942,3 ABD dolarıdır. IE4 motor kullandıklarında malzeme, kurulum ve parça değiştirme maliyetleri toplam 27.778,50 ABD doları ek maliyete yol açmıştır. Ancak yıllık enerji tasarrufu miktarı farkı 3.627 ABD doları olmuştur. Bu farkın sistem 20 yıl kullanıldığında 75.272,70 ABD doları, 25 yıl kullanıldığında 94.923,50 ABD doları olacağı sonucuna varmışlardır. Guan vd. [6], yaptıkları çalışmada soğutma sezonunda iki metro istasyonunda normal koşullarda ve tek başına dönüş havası koşullarında havalandırma ve iklimlendirme sisteminin performansının ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Tünel havalandırma sisteminde istasyonun her iki ucunda çift pistonlu hava bacaları kullanılmaktadır. Soğutma mevsiminde soğutma yükünü azaltmak için mekanik havalandırmayı azaltarak dış hava beslemesini azaltma olasılığı vardır. Bu sebeple mekanik dış hava beslemesinin olmadığı tek başına dönüş havası durumunu bu çalışmada denemişlerdir. Mekanik havalandırmanın olmadığı tek başına dönüş havası koşulu, dış hava sağlamak ve mekanik havalandırmanın enerji tüketiminden tasarruf etmek için hava sızmasından yararlanmaya katkıda bulunmuştur. Tek başına dönüş havası koşulundaki elektrik tüketimi, normal koşuldakine kıyasla benzer iç ortamla A istasyonunda %9,9 ve B

istasyonunda %19,6 oranında tasarruf sağlamıştır. Enerji tasarrufu etkisi, fanların daha düşük enerji tüketimine yol açan toplam dış hava girişinin ve soğutma yükünün azalmasına bağlıdır. Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin elektrik tüketiminin, soğutma mevsimindeki normal çalışma koşullarına kıyasla %10-%20 oranında azaldığını bulmuşlardır.

Zhang ve Li [7], metro istasyonlarında aşırı taze hava soğutma yükünü azaltmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Havalandırma sistemi tarafından sağlanan taze hava ile piston etkisiyle oluşan taze havayı ağ simülasyonları ile analiz etmişlerdir. Mevcut çalışma modunda havalandırma sistemi tarafından sürekli temiz hava verilmektedir, bu sebeple platformda ve istasyonda aşırı taze hava oluşmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre tüm çalışma süresi boyunca piston etkisiyle oluşan taze havanın, gerekli olan taze hava talebinden çok daha fazla olduğuna ve mekanik taze hava beslemesine gerek olmadığı kanısına varmışlardır. Ayrıca mevcut havalandırma sistemi ile hassas bir mekanik taze hava beslemesinin sağlanmadığını test etmişler ve sızdırmazlığı iyi olmayan taze hava damperinin sızdırmazlığını iyileştirmişlerdir. Şehirlerdeki metro istasyonlarının havalandırma sistemlerinin iyileştirilmesiyle enerji tasarrufu sağlanabileceğini söylemişlerdir. Liu vd. [8], metro tünellerinin CO₂ konsantrasyonuna ve termal ortamına göre havalandırma sistemi için optimum tren hızını ve enerji tüketimini bulmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Minimum tren hızını CO₂ konsantrasyonuna göre hesaplamışlardır. Konsantrasyonun 1500 ppm'den az olmasını sağlamak ve piston rüzgarından tamamen yararlanmak amacıyla tren hızının 23,14 m/s'den büyük olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Mekanik besleme havasının hacmini en aza indirmek ve tünelin CO₂ konsantrasyonunu ve termal ortamını optimize etmek amacıyla trenin optimum hızını 30 m/s olarak hesaplamışlar ve bu hızın trenin tünele saldırdığı ısının etkisini minimuma indirebileceğini öngörmüşlerdir. Piston rüzgarının etkin kullanımıyla tünel havalandırması için enerji tüketiminin %13-%32'sininin azaltılabileceğini bulmuşlardır. Li vd. [9], piston rüzgarını kullanarak serbest soğutma ve havalandırmadan yararlanmak için ayarlanabilir peron ayırıcı kapı sistemini kullanmışlardır. Peron ayırıcı kapıların üstüne ve altına ayarlanabilir havalandırma monte etmişlerdir. Menfezlerdeki maksimum hava hızını panjur açısının 90°'ye ayarlanması ve hava valflerinin tamamen açılması durumunda 5 m/s olarak bulmuşlardır. Tahmini elektrik tasarrufunu yıllık 275.785,71 kWh olarak hesaplamışlardır. Daha ileri bir çalışmada hava filtresinin piston rüzgarı

verilirken bir hava temizleme cihazı olarak düşünülebileceğini, platformlardaki hava kalitesinin hava filtresi, hava valfi ve panjur açılarının düzenlenmesiyle iyileştirebileceğini söylemişlerdir.

Su ve Li [10], yaptıkları çalışmada metro istasyonlarının enerji tasarruf potansiyellerini analiz etmek için bir enerji modeli oluşturmuşlardır. Model havalandırma sistemi, aydınlatma sistemi, dikey taşıma sistemi ve cihazları kapsamaktadır. Her bir sistemin enerji tüketimini hesapladıktan sonra modeli doğrulamak amacıyla Çin'de peron ayırıcı kapı sistemine sahip 6 farklı istasyonda saha testleri ve simülasyonları yapmışlardır. Modelin doğruluğunu %13'ten az bağıl sapma ile bir istasyonda kanıtlamışlardır. Modele göre 5 farklı tasarruf yöntemi önermişlerdir. Bunlar; iç hava sıcaklığını artırmak, mekanik taze hava beslemesini kaldırmak, peron ayırıcı kapı sisteminin hava geçirmezlik performansını iyileştirmek, havalandırma sisteminin enerji verimliliğini artırmak, aydınlatma gücü yoğunluğunu azaltmaktır. 5 önerinin tümü aynı anda uygulanırsa yıllık enerji tasarruf potansiyelinin incelenen 6 istasyonda %17 ile %32 oranında olabileceğini belirtmişlerdir. He vd. [11], yaptıkları çalışmada geçiş mevsiminde piston etkisiyle oluşan taze havayı etkin kullanarak havalandırma sisteminde enerji tasarrufu sağlamayı amaçlamışlardır. Yaptıkları çevresel kontrol sisteminin 5 modu vardır. Bunlar; mekanik havalandırma modu, pistonlu rüzgar havalandırma modu, mekanik ve piston rüzgar havalandırma modeli, dönüş havası havalandırması klima modeli ve tam taze hava havalandırması klima modudur. Pistonlu rüzgar havalandırma modelinde piston etkisiyle oluşan taze havanın bir kısmı, mekanik ve piston rüzgar havalandırma modelinde ise bu havanın tamamı kullanılmaktadır. Kontrol edilebilir havalandırma peron ayırıcı kapılar piston etkisiyle oluşan havanın verimli kullanılması nedeniyle enerji tasarrufu sağlamıştır. Sistemde iklimlendirme mevsiminde sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda kontrol edilebilir havalandırmalar kapatılmış ve klima sisteminin enerji tüketimi azaltılmıştır. Bu mevsimde sıcaklık düşük olduğunda ise kontrol edilebilir menfezler açılmış ve havalandırma sisteminin enerji tüketimi azaltılmıştır. Geleneksel peron ayırıcı kapı sisteminde Kunming ve Guiyang şehirlerinin enerji tüketimleri sırasıyla 75.888 kWh ve 57.890 kWh'tir. Kunming'de enerji tasarruf oranını %42,71 olarak hesaplamışlardır. Ancak Tianjin, Beijing, Guangzhou ve Nanning'de sırasıyla %9,67, %9,96, %11,07 ve %11,2 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışma sonucunda kontrol edilebilir havalandırma peron ayırıcı kapıların

ılıman iklimler için uygun olduğu, diğer iklimlerde enerji tasarrufu potansiyelinin sınırlı olduğu kanısına varmışlardır. Yu vd. [12], yer altı istasyonlarındaki havalandırma sisteminde enerji tasarrufu sağlamak için mevcut stratejileri incelemişlerdir. Peron ayırıcı kapılar peronu tünellerden ayırarak piston etkisini azaltır ve piston etkisinin havalandırma sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkisini en aza indirir. Ancak bu sistem tünellerde üretilen ısının piston etkisiyle dışarı atılmasını engelleyeceği için peron altı egzoz fanlarının enerji tüketimini arttıracaktır. Kapı perdeleri eklemek dışarıdan istasyonlara gelen soğuk hava miktarını azaltırken sıcak havanın da istasyon içinde tutulmasını sağlayabilir. Doğrudan genişmeli klima sisteminde soğutucu akışkan soğutulmuş su yerine besleme hava akışındaki ısıyı emerek serpantinlerde buharlaştırılır. Bu sistem soğutulmuş su sistemlerini ve boruları ortadan kaldırarak tasarruf edilmesine yardımcı olur. Makul bir havalandırma bacası tasarımı, minimum enerji girişi ile tünel havalandırmasının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Peron ayırıcı kapılar, havalandırma şaftları ve kapı perdeleri tren kaynaklı havanın kullanılması amacıyla enerji verimli metro istasyonlarında tercih edilen pasif stratejilerdir. Isıyı geri kazanmak amacıyla kullanılan ısı pompaları, doğrudan genişmeli klimalar ve değişken frekanslı cihazların uygulanması ise aktif stratejilerdir. İlk iki seçeneğin performansı çalışma koşullarından etkilendiğinden değişken frekanslı cihazların uygulanmasının en güvenilir enerji tasarrufu yollarından biri olduğu sonucuna varmışlardır.

Cheng vd. [13], havalandırma sisteminin enerji tüketimini azaltmak amacıyla enerji tasarrufu kısıtlama stratejisine sahip bir hava dengeleme modeli önermişlerdir. Bu yöntemde kontrolör hava dengeleme için gerekli fan voltajını ve damper açısını hava akışı talebini karşılamak için ayarlar. İlk olarak bir makine öğrenme modeli tasarlamışlardır. İkinci olarak kanal sisteminden ölçüm verileri almışlardır. Son olarak, verilen hava debisine göre gerekli fan voltajını ve damper açısının değerini modele göre tahmin etmişlerdir. Yaptıkları deney sonucunu konvansiyonel yöntemle karşılaştırdıklarında maksimum %37,1 enerji tasarrufu potansiyeli elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Önerdikleri yöntemin enerji verimli olduğu ve değişken yükteki havalandırma sisteminde verimli bir hava dengeleme stratejisi sağlayabileceği sonucuna varmışlardır. He vd. [14], çok faktörlü analize ve piston menfezinin hava özelliklerine dayalı metro havalandırma sisteminde enerji tasarrufu elde etmeyi amaçlamışlardır. İstasyon giriş-çıkışlarından istasyona akan taze hava hacmini etkileyen ana faktörleri incelemek

için dikey deney tasarımı yapmışlardır. Optimal kombinasyonun maksimum enerji tasarrufu 236.729 kWh iken, gerçek metro istasyonununki sadece 75.888 kWh olmuştur. Piston havasının istasyondan mümkün olduğunca uzakta olması gerektiği ve istasyondan çıkan piston havasının havalandırma etkisinin istasyona giren piston havasından daha güçlü olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca istasyon çıkışındaki piston menfezi ile istasyon arasındaki mesafenin yükseltilmesi metronun havalandırılmasında ve enerji tasarrufunda etkili olmuştur. Su ve Li [15], yaptıkları çalışmada Çin'in çeşitli iklim bölgelerindeki peron ayırıcı kapılara sahip metro istasyonları için işletme optimizasyonunun enerji tasarrufu potansiyellerini incelemişlerdir. Mekanik taze hava beslemesinin iptal edilmesi, peron ayırıcı kapının hava sızdırmazlığının artırılması, istasyon hava sıcaklığının artırılması, soğutma grubunun COP'sinin (etkinlik katsayısı) artırılması ve termal ekipmanların enerji verimlilik oranının artırılması inceledikleri yöntemlerdir. Mekanik taze hava hacmindeki artış havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini artırma eğilimindedir. Mekanik taze hava beslemesinin iptal edilmesinin, daha sıcak bölgelerde bulunan metro istasyonları için daha fazla enerji tasarrufu sağlama eğilimindedir. Böylece daha yüksek dış hava sıcaklığı mekanik temiz hava yükünün toplam soğutma yükü içindeki oranının daha yüksek olmasına ve ayrıca daha uzun iklimlendirme süresine yol açar. Bu nedenle, mekanik taze hava beslemesinin iptalinin, daha sıcak iklimlerde daha yüksek enerji tasarrufuyla sonuçlanma eğiliminde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Peron ayırıcı kapı sistemi, havalandırma ve iklimlendirme sisteminin soğutma yükünü ve enerji tüketimini azaltma avantajına sahiptir. Peron ayırıcı kapının direnç katsayısının artırılmasının düzensiz hava sızma hacminin azalmasına yol açarak havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini azaltabilir. İstasyon sıcaklığı ne kadar düşük olursa düzensiz hava infiltrasyonu ve mekanik taze hava soğutma yükü o kadar yüksek olur. Bu nedenle düşük istasyon sıcaklığı havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini arttırabilir. Soğutma grubunun COP'sinin iyileştirilmesi aynı soğutma kapasitesine sahip soğutma grubunun enerji kullanımını azaltabilir. Terminal ekipmanların enerji verimlilik oranlarının iyileştirilmesi enerji kullanımını azaltabilir. Elde ettikleri sonuçlara göre istasyon hava sıcaklığının artmasının %16,9–%21,0; mekanik taze hava beslemesini iptal ederek soğutma grubunun COP'sini iyileştirmeye ve terminal ekipmanın enerji verimlilik oranının artırılmasıyla %11,6–%20,3 oranında enerji tasarrufu potansiyeli

sağlanmıştır. Peron ayırıcı kapının hava sızdırmazlığının artırılması %5'ten daha az enerji tasarrufu sağladığı için havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tasarrufu üzerinde en düşük etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yang vd. [16], piston rüzgarından yararlanarak enerji tüketimini azaltmak amacıyla yan platforma kanatları ayarlanabilir yenilikçi peron kapıları uygulamasını incelemişlerdir. Gerçek bir metro istasyonuna dayalı olarak sayısal model geliştirmişler ve simülasyon sonuçlarını doğrulamışlardır. Platformdaki taze hava hacmini, ayarlanabilir havalandırmanın konumunu, boyutunu ve açısının etkisini incelemişlerdir. Piston rüzgarının yıl boyunca etkin kullanılmasıyla farklı iklim bölgelerinde havalandırma enerji tüketiminin %19,3-%57,25 oranında azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Yenilikçi peron kapıları ile yan ve ada platformlar arasında taze hava hacmi ve termal ortam karşılaştırması yapmışlar ve piston rüzgarının yan platformda daha fazla taze hava sağladığı ve termal ortamı iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Piston rüzgarından etkin bir şekilde yararlanmak için ayarlanabilir menfezlerin konumları, boyutları ve açılarının platformun termal ortama ve taze hava hacmine olan etkisini kanıtlamışlardır. Kışın yenilikçi peron kapılarının üstüne ayarlanabilir menfezler yerleştirildiğinde tünelden daha fazla ısının platforma gelebildiğine, istasyonun taze hava ihtiyacını karşılamak için menfez ölçüsünün 100 mm'den, açılma açısının ise 75°den büyük olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Yenilikçi peron kapıları sisteminin Çin'in farklı bölgelerindeki termal konfor gereksinimlerini karşılayabildiğine ve 5 farklı iklim bölgesinde yıllık 102,8-922,8 kWh enerji tasarrufu sağladığına ulaşmışlardır. Bae vd. [17], bir metro istasyonunun havalandırma sisteminde basit açma/kapama kontrolü ile değişken hız kontrolünün enerji tasarrufu verilerini karşılaştırmışlardır. Değişken hız kontrol yönteminin %71 enerji tasarrufu etkisine sahip olduğu ve fan motorunun değişken hız kontrolü ile değiştirilmesinin %73 enerji tasarrufu sağladığını gözlemlemişlerdir. Uygun bir değişken hız kontrol yönteminin, bir fan motorunun değiştirilmesinden daha yüksek enerji tasarrufu sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada metroda havalandırmanın neden gerekli olduğu, metrolardaki havalandırma sisteminin çalışma prensibi ve havalandırma sistemindeki enerji tüketimine etki eden parametreler incelenmiş, havalandırma performansından ödün vermeden daha az enerji tüketmeyi sağlayacak önerilerde bulunulmuştur. Verimlilik ve daha iyi iç hava kalitesi sağlamak

amacıyla sunulan bu önerilerin bu konuda çalışma yapan araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmiştir.

2. HAVALANDIRMA (VENTILATION)

Havalandırma, zararlı kirletici konsantrasyonlarının seyreltilip mahalden uzaklaştırılarak mahale taze havanın verilmesi işlemidir. Yeterli hava kalitesi için gereken havalandırma miktarı yolcu yoğunluğu, yolcu faaliyeti ve ortamdaki kirletici emisyonlara bağlıdır. Havalandırma, zararlı kirleticilerin konsantrasyonlarını minimuma indirmek için kritik önem taşır. Bu sebeple yüksek havalandırma oranları genellikle daha iyi sağlıkla ilişkilendirilir [18].

Ortamdaki karbondioksitin dışarı atılarak gerekli oksijen ihtiyacının karşılanması, fazla ısı ve nemin dışarı atılması, gürültü ve rahatsız edici kokulardan kurutulmak gibi birçok nedenden dolayı havalandırmaya ihtiyaç duyulur. Havalandırma yapılırken mahal havasının temizliğini, tezeliğini, sıcaklığını hızını ve nemini kontrol altında tutmak gerekmektedir [19].

2.1. Metro Ortamında İç Hava Kalitesi ve Havalandırmanın Gerekliliği (Indoor Air Quality in Subway Environment and the Necessity of Ventilation)

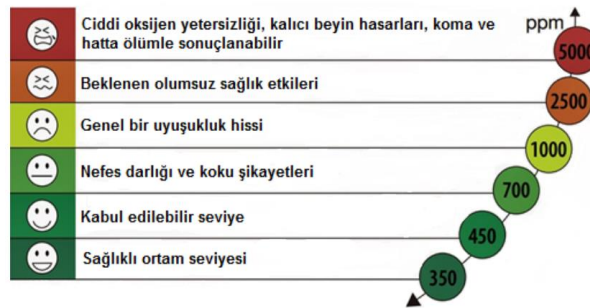
Yeterli iç hava kalitesi, yeterli miktarda temiz havanın iç ortama verilmesidir. İnsanlardan ve diğer kirleticilerden kaynaklanan CO₂ miktarı iç hava kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. ASHRAE 55'e göre [20], ortamdaki kirlilik dış havadan 400 ppm kadar fazla olabilmektedir. Sağlığa uygun kabul edilen dış hava kirlilik değerleri ise 600 ppm'e kadardır. Yani bir iç ortamdaki CO₂ ppm değeri en fazla 900-1000 olmalıdır.

İnsanlardan ve iş makinelerinden kaynaklanan ısı ve emisyonlar, sıcaklık, nem, trenlerin hareketiyle rayda oluşan aşınmalar ve hava hızlarında oluşan değişimler, istasyon yapısı ve havalandırma sistemleri metro ortamındaki iç hava kalitesini etkileyen unsurlardır [21,22].

Yolcular zamanlarının kısa bir süresini metroda geçirmelerine rağmen metrodaki partikül madde seviyesi yüksekse, geçirilen kısa süre bile kişinin maruziyetine büyük katkı sağlayabilir [23]. Günümüzde hava kirleticilerine maruz kalmak akut ve kronik olumsuz sağlık etkilerine yol açmaktadır [24]. Ayrıca metro istasyonlarında çalışan personeller, kronik sağlık sorunlarına neden olabilecek sürelerde (günde 8-10 saat) yüksek konsantrasyonlarda hava kirleticilerine maruz kalmaktadır [25].

CO₂, uçucu organik bileşikler, partikül maddeler ve kötü kokular yaygın iç mekan kirleticilerini oluştururlar.

CO₂ konsantrasyonu, metro istasyonları da dahil olmak üzere binalarda havalandırma oranına karar vermek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir [26]. Metro istasyonlarındaki CO₂ konsantrasyonunun sınırı ülkelere göre farklılık gösterir. Örneğin Kore'de 1000 ppm ve Çin'de 1500 ppm'dir [6]. ASHRAE'nin 62-1989 no'lu standardına göre 1000 ppm değeri konfor üst sınırındadır [27]. CO₂, zehirsiz bir gazdır ancak ortamdaki oksijen seviyesini düşürerek boğulmaya sebep olmaktadır. Bir ortamdaki CO₂ seviyesinin 3.500 ppm'in üzerine çıkması insanlarda solunum yetmezliği ve sinir sisteminde olumsuz etkiler yaratmaktadır [28]. Ortamdaki CO₂ konsantrasyonu ile bu konsantrasyonların insanlar üzerinde yarattığı etkiler arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir [29]. Ortamdaki CO₂ konsantrasyonu arttıkça insanlar üzerinde gözlenen olumsuz etkiler de artmaktadır.



Şekil 1. CO₂ konsantrasyon seviyesinin insanlar üzerindeki etkileri [29] (Effects of CO₂ concentration level on humans)

Uçucu organik bileşikler, kaynama noktası 260°C'den düşük olan bazı parafin, benzen, naftalin gibi bileşiklerdir. En yaygın olanı BTEX olarak ifade edilen benzen, toluen, etilbenzen ve ksilendir.

Bu bileşikler arasından iç ortamda en yüksek seviyede bulunana ise toluendir. Solunduklarında ya da deri yoluyla vücuda nüfuz ettiğinde sağlık sorunlarına yol açabilirler. Bu bileşiklere yüksek miktarda maruz kalmak insanlarda baş ağrısı, baş dönmesi ve görme bozukluğuna yol açabilmektedir [30].

Partikül madde havadaki toz, duman, buğu gibi katı ya da sıvı paritküllerden oluşur. Aerodinamik çapları 2,5 µm'den büyük, 10 µm'den küçük olan solunabilir kaba parçacıkları ve çapı 2,5 µm'ye eşit veya daha küçük olan ince parçacıkları içerir [31,32]. Metro sistemleri, toz birikmesine neden olabilecek kapalı bir alanda çalıştığı için metro platformu havasındaki solunabilir PM'nin çoğu yer altında üretilir ve bu nedenle açık havada solunandan farklıdır [33]. Metro istasyonlarındaki PM2.5 ve PM10 konsantrasyonlarının kaynağı piston rüzgarıyla getirilen parçacıklar ile raylar ve tekerlekler arasındaki aşınma ve sürtünmeler sonucu açığa çıkan parçacıklardır [34,35].

Profesyonel sağlık çalışanları boyutu 2 µm'den küçük parçacıkların akciğerlerde tutulduğunu düşünmektedirler [36]. Aerodinamik çapı 8-10 µm'den büyük olan parçacıklar ise üst solunum yolları tarafından ayrılarak tutulur [37]. Bu parçacıkların genotoksik olduğu ve akciğer hücreleri üzerinde oksidatif stres yarattığı görülmüştür [38]. Partikül maddelere uzun süreli maruz kalındığında ise akciğer fonksiyonlarında azalma, solunum semptomları, kronik bronşit gibi sağlık sorunları oluşabileceği epidemiyolojik çalışmalarla kanıtlanmıştır [39].

Partikül madde, karbondioksit ve uçucu organik bileşiklerin yanı sıra biyoaerosol, CO, NO₂, O₃ ve rahatsız edici kokular metro ortamında bulunan diğer kirleticilerdir. Bakteri, mantar ve virüs gibi biyolojik partiküllerden oluşan ve alerjik rahatsızlıklara sebep olan biyoaerosoller kalabalık bir ortama ve sınırlı havalandırmaya sahip olan metrolarda rahatça yayılabilmektedirler. CO zehirlenmelerinde insanlarda baş ağrısı, mide bulantısı ve nefes sıkışması gözlenmektedir [40]. NO₂'ye 24 saatten kısa bir süre maruz kalmak sağlıklı bireylerde astım nöbetlerinin sayısında artış ve hava yolu iltihabı gibi solunum etkilerine yol açabilir [32].

Hava kirleticileri oksidatif stresin yanı sıra akut ve kronik olmak üzere pek çok solunum yolu hastalığına yol açmaktadır. Akut hastalıklar tahriş, iltihap, alerjik reaksiyon ve solunum yetmezliğinden oluşur. Kronik hastalıklar ise

KOAH, kardiyovasküler hastalıklar, astım ve kanserden oluşur.

Metrolarda iç hava kalitesi yönetimindeki temel yaklaşım insanların konforunun iyileştirilmesi, yolcu maruziyetini minimuma indirmek ve enerji ihtiyacını minimum düzeyde tutmaktır [21]. Metrodaki havalandırma sistemi, metroya temiz hava sağlanması ve havadaki kirletici maddelerin metrodan dışarı atılması için önemli bir yere sahiptir. Tünel havası ile istasyon arasındaki hava değişim miktarı sıcaklık, nem ve iç hava kalitesi dahil olmak üzere metro ortamını önemli ölçüde etkiler. Metro ortamında sağlıklı bir hava kalitesi sağlamak için uygun havalandırma sisteminin tasarlanması gerekir. Verimli havalandırma sistemleri ile dışarıdan gelen kirletici konsantrasyonu azaltılarak iç hava kalitesi istenen seviyede tutulabilir.

2.2. Metro Havalandırması (Subway Ventilation)

Metro sistemlerinde havalandırma ihtiyacı işletme çeşidine göre belirlenir. İşletme koşulları normal işletme, sıkışık işletme ve acil durum işletmesi olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Normal işletme koşulunda yolculu alanların konfor düzeyini sağlamak için sıcak hava tünellerden alınıp taze hava içeri çekilir. Taze havanın girmesi ve tren ısısının atılması için istasyonun her iki ucunda havalandırma şaftları bulunur. Sıcak havada istasyon ve tünellerde hava değişimlerini takviye etmek amacıyla taze hava içeri çekilir ve sıcak havanın boşaltılması için tünel havalandırma fanları çalıştırılır.

Sıkışık işletme koşulunda piston etkisi sonucu oluşan hava akımını sağlamak için tünel havalandırma fanları çalıştırılır. Tünelin bir ucundaki fanlar boşaltma durumundayken diğer ucundaki fanlar besleme durumunda çalıştırılarak hava akımı sağlanır. Uzun süre tren geçmediği tespit edildiğinde bu işletme şekli otomatik başlatılır.

Acil durum koşulunda tünel havalandırma fanları itme ve çekme hareketiyle çalıştırılır. Yangına karşı gerekli taze hava için fanlar aynı anda besleme veya boşaltma durumunda çalıştırılabilir. Dumanın toplanmasını önlemek ve sıcak dumanı istenen yönde akmaya zorlamak için gerekli minimum hava hızına kritik hız denir ve tünel havalandırma fanlarının giriş-çıkış değerleri kritik hızı sağlamalıdır.

Havalandırma ihtiyacı ise doğal havalandırma ve mekanik havalandırma olmak üzere iki farklı şekilde sağlanmaktadır. Doğal havalandırma,

trenlerin tünel içerisindeki hareketinden kaynaklı olarak oluşur. Ancak doğal havalandırma tek başına yeterli olmadığı için mekanik havalandırmaya ihtiyaç duyulur.

Mekanik havalandırma sistemleri ise iç havalandırma fanı, egzoz havalandırma fanı ve tünel havalandırma fanı sistemlerinden oluşur. İç havalandırma sistemi temiz havanın içeri alınmasında, egzoz havalandırma sistemi kirli havanın dışarıya atılmasında ve tünel havalandırma sistemi ise tünellerin havalandırılmasında kullanılır. Mekanik havalandırma sistemi acil durum işletmesi şartları baz alınarak tasarlanır [41].

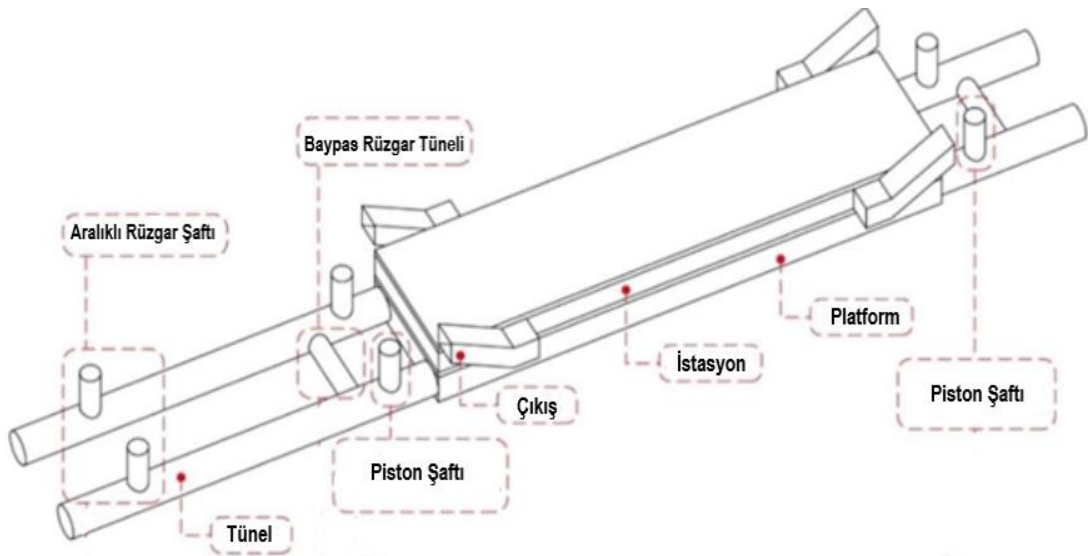
İç havalandırma sistemleri aracılığıyla temiz hava shaftlardan çekilerek yolculu alanlara verilir. Kirli hava ise egzoz havalandırma sistemleri aracılığıyla ortamdan çekilerek shaftlardan dışarı atılır. Tünel havalandırma sistemleri, hem temiz havayı çekmeyi hem de kirli havayı dışarı atmayı sağlayan aksiyel fanlardan oluşur [21].

Acil durumlarda da iç havalandırma sistemlerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca egzoz havalandırma sistemi acil durumlarda dumani istasyondan dışarı atması amacıyla da kullanılmaktadır. Tünel havalandırma sistemleri ise tünellerin havalandırılması, sıkışık durumlarda ve acil durumlarda hava ihtiyacını karşılaması amacıyla kullanılmaktadır. Tünel havalandırma sistemleri hem temiz havayı çekmeyi hem de kirli havayı dışarı atmayı sağlayan aksiyel fanlardan oluşmaktadır. Bu sistemler yolcuların seyahati boyunca, personellerin de iş ortamında konforun ve güvenliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır [21].

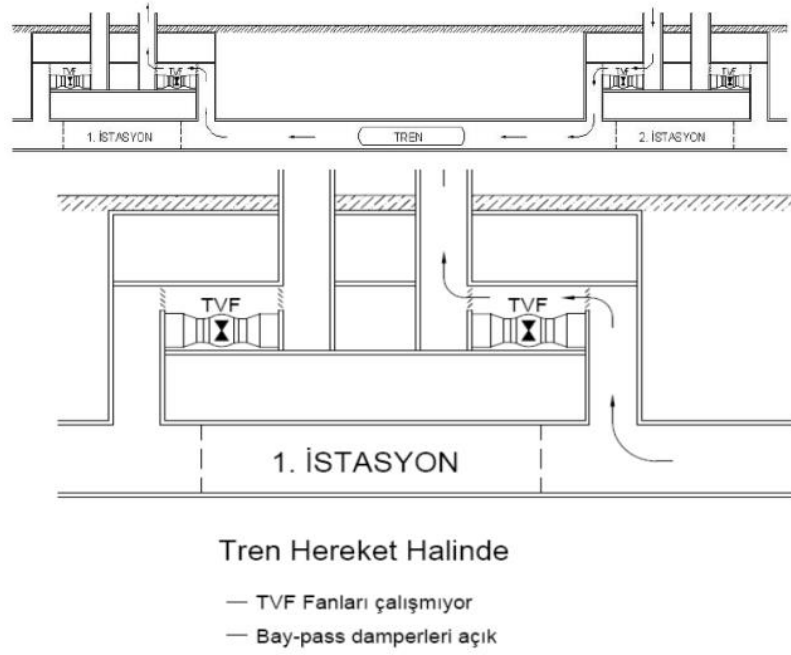
Mekanik havalandırmada fanlar değişken devirli çalıştırılarak her işletme koşulu için gerekli hava debisi sağlanır. Sıkışık işletme koşulunda fan devri düşürülerek menfez ve kanallar ile peron havalandırılıp soğutulurken, acil durumlarda ise fan devri artırılmaktadır [42]. Acil durum anında kullanılan fanlar ve hava akımına maruz kalan tüm ekipmanlar havalandırma sisteminin çalışmaya devam edebilmesi için en az bir saat boyunca 250°C sıcaklığa dayanabilecek şekilde tasarlanmalıdır [43].

Olası bir yangın durumunda tünelde olması gereken minimum hava hızı insanların hava akımını hissedebileceği en düşük hız olan 2,5 m/s, maksimum hava hızı ise insanların yürüyebilecekleri en yüksek hava akımı değeri olan 11 m/s'dir. Yangın haricinde ise tünelde olması gereken minimum hava hızı 7,5 m/s'dir [43]. Herhangi bir metro istasyonunun mekansal prototipi Şekil 2'de [44], normal işletme koşullarında havalandırmanın çalışma prensibi ise Şekil 3'te [45] gösterilmiştir.

Trenler istasyona vardıklarında aralıklı rüzgar shaftları tünellere havalandırma sağlarlar. Trenin hızlı hareketinden kaynaklanan piston rüzgarları metro istasyonunun termal ortamını güçlü bir şekilde etkiler. Piston shaftı ve baypas rüzgar tüneli piston rüzgarlarını diğer tünele boşaltır. Piston rüzgarlarını önlemek amacıyla tam yükseklikteki peron ayırıcı kapı sistemine sahip istasyonlarda bu shaftlar basıncı azaltmak amacıyla piston rüzgarlarını önceden boşaltır [44].



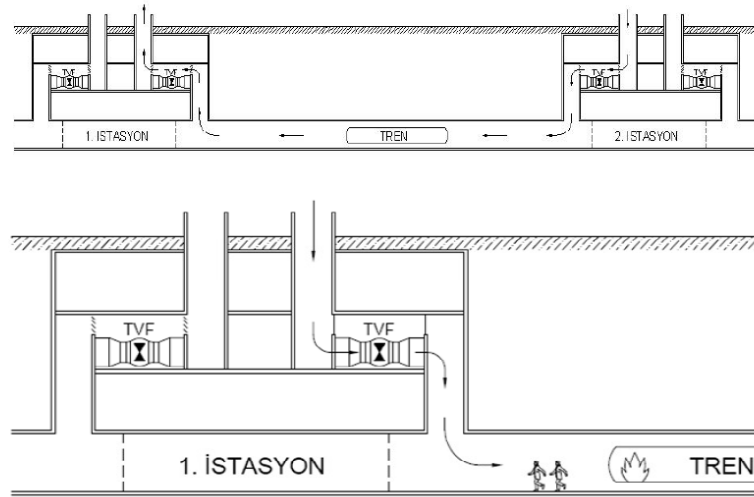
Şekil 2. Metro havalandırmasının mekansal prototipi [44] (Spatial prototype of subway ventilation)



Şekil 3. Normal işletme koşulunda havalandırma sisteminin çalışma prensibi [45] (Principle of operation of the ventilation system under normal operating conditions)

Acil durumlarda istasyon ve tünellerde bulunan tünel havalandırma ve egzoz fanları devreye girerek dumanın tahliye edilmesini ve tünelin soğutulmasını sağlar. Şekil 4'teki örnekte tren 1. istasyonun yakınında bulunmaktadır. Burada yangın çıktığında 1. istasyondaki tünel

havalandırma fanları devreye girerek tünele taze hava verecek ve bu taze hava tünele yayılan dumanı 2. istasyona süpürecek. Daha sonra 2. istasyondaki tünel havalandırma fanları devreye girerek tüneldeki dumanı tahliye edecektir [46].



Şekil 4. Tren 1. istasyona yakınken yangın çıkması durumu [45] (Fire outbreak when the train is close to station 1)

3. HAVALANDIRMA SİSTEMİNİN ENERJİ TÜKETİMİ (ENERGY CONSUMPTION OF THE VENTILATION SYSTEM)

Metroda konforlu bir iç ortam sağlamak için havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Havalandırma sistemi metrodaki enerji tüketiminin %54-71'ini oluşturmaktadır [10]. Havalandırma

sistemlerinin performansının iyileştirilmesi, bir metro istasyonunda büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği anlamına gelmektedir.

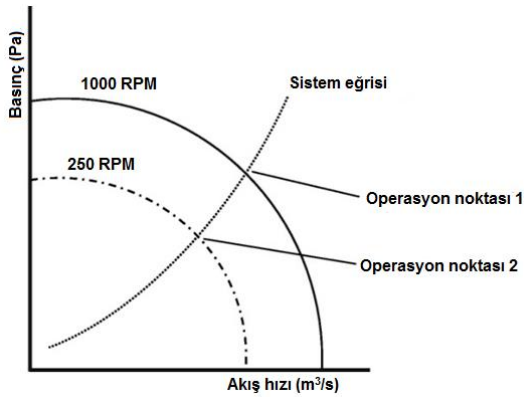
3.1. Fanların Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Fans on Energy Consumption)

Fanlar, metro ortamına temiz hava vererek ortam sıcaklığını azaltmanın yanı sıra duman tahliyesini

de sağlarlar. Acil durum anında sensörler tarafından uyarılan fanlar hızlanarak kirli havayı tünelin sonuna yönlendiriler. Bu sayede istasyon ve tünellerin soğutulmasını, dumanın tahliye edilmesini ve yolculara dumansız bir atmosfer sağlarlar. Fanlar, istasyon ve tünelde olması gereken hava hızlarını sağlayacak kapasitede seçilmelidir [47,48].

Havalandırma sağlayan fanların anma değerleri, kullanımına bağlı olarak 100 kW [49] ile yaklaşık 3.000 kW [50] arasında değişebilmektedir. Bu nedenle, havalandırma fanları toplam güç tüketimine oldukça önemli bir katkı sağlamaktadır.

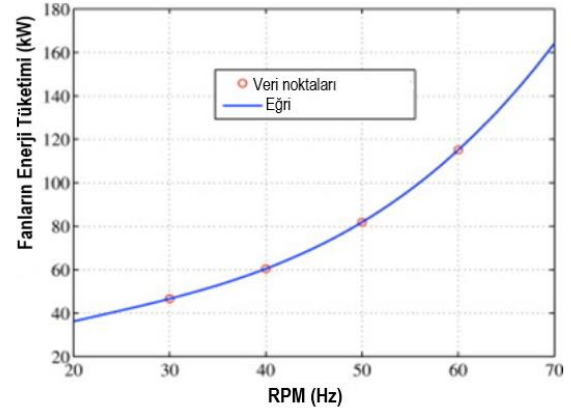
Belirli bir fan, fan eğrisiyle, yani fanın belirli bir akış hızını sağlamak için ne kadar basınç gerektiği ile karakterize edilebilir. Fan eğrilerinin basit bir örneği Şekil 5'te gösterilmektedir. Belirli bir hızda çalışan bir fan, buna karşılık gelen fan eğrisine sahiptir. Bu nedenle hızın değiştirilmesi yeni bir eğri ile sonuçlanacaktır. Hız düştükçe aynı debiyi elde etmek için daha düşük basma yüksekliği/basınç gerekmektedir. Bu, fanı beslemek için daha az güç ihtiyacı duyulduğu anlamına gelir. Böylece daha düşük çalışma hızlarında daha az güç tüketilir [51].



Şekil 5. Fan eğrileri [51] (Fan curves)

Havalandırma fanlarının enerji tüketimi, fan hızından hesaplanabilir. Fan hızı (RPM) ve enerji tüketimi arasındaki ilişki Şekil 6'da gösterilmekte olup denklem (1) ile ifade edilebilir [52]:

$$\text{Enerji Tüketimi} = 0,0007(\text{RPM})^3 - 0,046(\text{RPM})^2 + 2,01(\text{RPM}) + 8,8 \quad (1)$$



Şekil 6. Fan hızı (RPM) ile enerji tüketimi arasındaki ilişki [52] (The relationship between fan speed (RPM) and energy consumption)

Bu şekle göre fan hızındaki artış enerji tüketiminin de artmasına yol açmaktadır. Bir fanın toplam gücü bulunurken ihtiyaç duyulan toplam hava debisi, sistemin toplam basınç kaybı ve fanın verimi dikkate alınmakta olup;

$$P = \frac{\dot{V} \times \Delta P}{\eta} \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir [53].

Sürtünme kayıpları, mekanik kayıplar, sonlu kanat sayısından dolayı basıncın düşmesi, hacimsel kayıplar ve basınç kayıpları fanlarda enerji verimliliğine etki eden unsurlardır. Optimum kanat tasarımı yapmak ve fan seçimi yaparken fanın bağlı olarak çalışacağı kanal sistemi karakteristiğinin dikkate alınması fan verimliliğinin artırılmasını sağlar. Çoğu zaman fanlarda enerji tasarrufu potansiyeli %30'dan fazladır [53,54].

Fanlarda kapasite kontrolü yapabilmek ve enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan bazı yöntemler vardır. Bunlar; fanın konumunun değiştirilmesi, giriş ve çıkış damperlerinin kontrolünün sağlanması, kanal tasarımının iyileştirilmesi, fanın karakteristik eğrisinin değiştirilmesi, fanın dönme hızının ayarlanması, fanın kanat açısının ayarlanması ve fanların seri ya da paralel bağlanması olarak sıralanabilir [54].

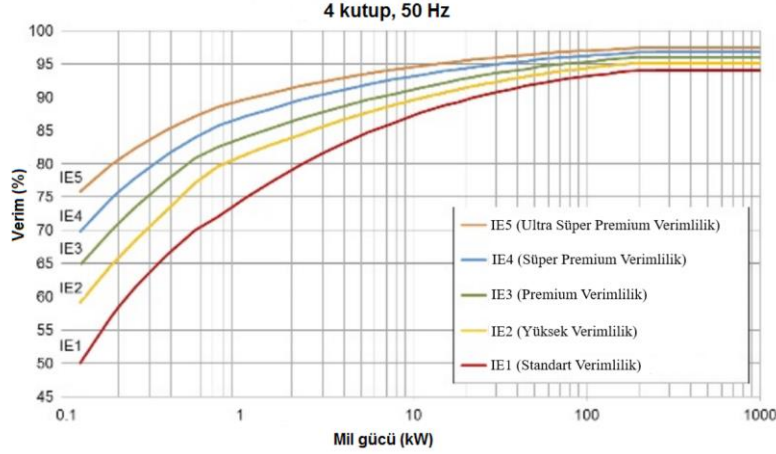
3.2. Elektrik Motorlarının Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Electric Motors on Energy Consumption)

Endüstriyel motorlardaki enerji tüketiminin %22'si fanlar aracılığıyla gerçekleşmekte olup metro istasyonlarındaki havalandırma sistemlerinde genellikle IE2 sınıf motorlar kullanılmaktadır [5,55].

Motor verimlilikleri IEC tarafından IE1 Sınıfı (Standart Motorlar), IE2 Sınıfı (Yüksek Verimli Motorlar), IE3 Sınıfı (Premium Verimli Motorlar) ve IE4 Sınıfı (Süper Premium Verimli Motorlar) olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır [56].

IE5 Ultra Süper Premium verimlilik sınıfına ait motorlarla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

4 kutuplu ve 50 Hz bir elektrik motorunun çıkış gücü ile verimliliği arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmiştir [57].



Şekil 7. IEC elektrik motoru çıkış gücü ile verimlilik arasındaki ilişki [57] (Relationship between IEC electric motor output power and efficiency)

Havalandırma sistemlerinde kullanılan fan motorlarını daha yüksek verimliliğe sahip motorlarla değiştirerek enerji tasarrufu sağlamak mümkündür. Aktaş vd. [58], bir firmanın fan sistemindeki elektrik motorlarının önemli ölçüde elektrik tükettiğini saptamışlardır. Mevcut sistemdeki %91,3 verimliliğe sahip 3 adet IE2 sınıfı motorun %94 verimliliğe sahip IE4 sınıfı motorla değiştirdiklerinde 3 adet fandan yıllık 12.904,18 kWh tasarruf edileceğini ve fan verimliliğinde %3 oranında artış olacağını hesaplamışlardır. Ayrıca IE4 sınıfı motorun kullanılması ile elektrik enerjisi maliyetinin de %3,49 oranında azalacağını belirleyerek fan sistemindeki elektrik motorlarında yapılacak iyileştirmeler ile enerjinin daha etkin kullanılacağı ve üretim maliyetlerinin azaltılacağı sonucuna varmışlardır.

3.3. CO₂ Miktarının Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of CO₂ Amount on Energy Consumption)

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından birim net elektrik üretimi ve birim elektrik tüketimi başına salınan sera gazı emisyonlarının miktarlarını temsil eden Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, Türkiye'de 1 MWh (birim) net elektrik üretimi başına ortalama 0,440 ton CO₂-eşdeğer sera gazı emisyonu salındığı bulunmuştur. Elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bağlantı noktasına göre değişiklik göstermekle birlikte iletim hattından

bağlı tüketim noktası için birim elektrik tüketimi başına 0,447 ton CO₂-eşdeğer, dağıtım hattından bağlı tüketim noktası için birim elektrik tüketimi başına 0,484 ton CO₂-eşdeğer sera gazı emisyonu salınmaktadır. Bu faktörler, karbon ayak izi hesaplamaları ve sera gazı azaltım miktarlarının hesaplanması gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir [59].

Aktaş vd. [58], yaptıkları çalışmada fan sistemindeki elektrik motorlarını değiştirerek fan performans artışının yıllık 5.677,83 kg eş değer karbon salımına engel olacağını hesaplamışlardır.

3.4. Havalandırma Ekipmanlarında Oluşan Kirliliğin Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Pollution in Ventilation Equipment on Energy Consumption)

Havalandırma sistemlerinde kullanılan ekipmanlar, oluşturulacak hava kalitesinin belirlenmesinde rol oynamaktadırlar. Hava kalitesinin belirleyici faktörlerinden olan filtreler tanecik ve tozları tutmak, havadaki virüs ve bakterileri azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Yetersiz ve kötü filtreleme kötü iç hava kalitesi, mikroorganizmaların üreyerek enfeksiyon riskinin artmasına, yüksek enerji maliyetlerine, havalandırma sistemindeki cihazların bozulması işlevlerini yerine getirememeleri gibi pek çok olumsuz sonuca yol açmaktadır [55].

Bir hava filtresi, temiz olduğu zaman en düşük verime sahiptir. Filtre toz tutarak tıkanıkça

filtrenin verimi ve basınç düşümü değeri yükselmektedir. Basınç düşümü değeri yükseldikçe tıkanan filtreler hava akışını, soğutmayı ve nem gidermeyi engellediğinden havanın geçmesi için daha çok enerji gerekir. Bu da işletme masrafının artmasına neden olur. Hava filtreleri hijyenik sebepler ve artan enerji maliyetleri nedeniyle yıkanmamalıdır. Yıkandıktan sonra lif dağılımı bozulan filtreler zaman içinde temiz bir filtreye göre daha fazla direnç oluşturarak toz tutamayacak ve arka kademelerdeki yüksek verimli filtrelerin erken dolmasına yol açacaktır. Yüksek direnç yüksek enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir. Filtrelerin debileri katalog değerlerinin biraz altında seçildiği takdirde kullanım ömürleri ve verimleri artacak, enerji maliyetleri de düşecektir [55,60].

Filtrenin enerji tüketimi Eurovent 4/11 kılavuzuna göre aşağıdaki denklemle hesaplanır [61]:

$$W = \frac{\dot{V} \times \Delta P \times \Delta t}{\eta \times 1000} \quad (3)$$

Bu denklem, filtrelerin yıllık enerji tüketimlerinin yanı sıra, ΔP değerinin anlık kullanılmasıyla filtrelerin tükettikleri enerji miktarlarının hesaplanmasını da sağlar.

Metalik yüzeye yapışan kir ve toz topaklarında üreyen küf ve mantarlar daha fazla nemin tutulmasına yol açarak korozyona sebebiyet vermektedir. Bu korozyon havalandırma sisteminin hem enerji tüketimini arttırmakta hem de performansını düşürerek kötü hava kalitesine neden olmaktadır. Kanal montajı sırasında yapılmış hatalar, inşaat esnasında ya da sonradan oluşarak kanallarda sürüklenen bu kir ve tozlar hem filtrelerin kirlenmesine hem de sürtünme kaybı yaratarak toplam hava debisinde azalmaya yol açarlar. Bu da kaybın karşılanması için bir miktar daha elektrik enerjisi gerekli olması anlamına gelmektedir. Yapılan ölçümler, 1 mm'lik kir tabakasının ısı transferini yaklaşık %10 oranında azalttığını göstermiştir. Yani aynı ısı verimi elde etmek için gerekli enerji sarfiyatının %10 artması gerekmektedir. Düzenli olarak temizliği yapılan hava kanalları ile havalandırma sisteminin verimliliğini arttırmanın yanı sıra sağlıklı bir iç hava kalitesi sağlamak da mümkündür [62,63].

Havalandırma kanallarının doğru tasarımı ve düzenli bakımı, sağlıklı bir iç hava kalitesinin oluşturulması ve havalandırma sisteminin enerji tüketiminin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

Serpantinlerin performansı, ısı transfer yüzeylerinde biriken tortular sebebiyle zamanla

kötülebilir. Tortu tabakası, ısı transfer direncine ek direnç göstererek ısı transfer hızının azalmasına neden olur. Bu birikmelerin ısı transferi üzerindeki net etkisi R_f kirlenme faktörü ile gösterilmekte olup bu değer kirlenmenin ortaya çıkardığı ısı direncin bir ölçüsüdür. Bu faktörün de bir direnç olarak diğer dirençlere ilave edilmesiyle ısı transferi hesaplanmaktadır. Bu durumda ısı aktarımı;

$$R_{toplam} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (4)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir [64].

Kirlenme faktörü yeni bir serpantinde sıfırdır ve yüzeyde oluşan katı birikintilerden dolayı zamanla artar. Kirlenme faktörü hizmet süresine, akışkanın sıcaklığına ve hızına bağlıdır. Sıcaklığın artması ve hızın azalmasıyla kirlilik artar [64].

3.5. Talep Kontrollü Havalandırma (Demand Controlled Ventilation)

Talep kontrollü havalandırma, iç hava kalitesine bağlı olarak kontrollü hava akış hızına sahip bir havalandırma sistemidir. Bu sistemler, fanın çalışma süresince azaltılmış hava akış hızında çalıştığı için sabit hava hacimli havalandırma sisteminde göre daha az enerjiye ihtiyaç duyar [65].

Havalandırma talebini değerlendirmenin birkaç yolu vardır:

-İzlenen her bölgede insan varlığını ve sayısını algılayan doluluk sensörleri

-Karbondioksit konsantrasyonunu izleyen CO₂ sensörleri

-Bir bina otomasyon sisteminin günün saatine göre mevcut nüfusu tahmin etmesine izin veren programlar

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın talep kontrollü havalandırma yöntemleri mevcut popülasyona göre dış hava girişini değiştirmeye çalışır [66].

CO₂ bazlı talep kontrollü havalandırma kişi başına havalandırma oranı için bir gösterge olarak CO₂ konsantrasyonlarını kullanılmasını ifade eder. Bu bağlamda CO₂ bir iç mekan hava kirleticisi değil, solunumun yan ürünü olarak kabul edilir. Kararlı durum koşullarında iç mekan ve dış mekan karbondioksit konsantrasyonları arasındaki farkı tahmin etmek için aşağıdaki denklem kullanılır [66]:

$$V_o = \frac{N}{C_s - C_o}$$

(5) yakınında bir kirletici tespit edilmesi durumunda kirleticilerin girmesini önlemek amacıyla bir izolasyon cihazı kurulması [70] ve PM2.5 konsantrasyonlarının aynı filtrenin 90 günden fazla kullanılmasından etkilenmediğinden dolayı bu durumun maliyet tasarrufu sağlayabileceği [71] araştırmacılar tarafından sunulan önerilerden bazılarıdır. Bunlara ek olarak, bu konuda çalışma yapan araştırmacılar Tablo 1'deki yeni yaklaşım ve önerilerden yararlanabilirler;

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Havalandırma sistemlerinin enerji ihtiyacı ile metro istasyonlarındaki iç hava kalitesinin beraber değerlendirilmesi gerekir. Bugüne kadar yapılan çalışmalara bakıldığında bitki biyofiltresinin havadaki demir oksiti azalttığı [68], manyetik hibrit filtre kullanımının PM10 konsantrasyonlarında azalmaya neden olduğu [69] kanıtlanmıştır. Bunların yanı sıra hava giriş menfezlerinin

Tablo 1. Çalışmada bahsedilen problemler ve bu problemlere sunulan çözüm önerileri (The problems mentioned in the study and the proposed solutions to these problems)

Problem	Problemin Detayı	Çözüm Önerisi
Yüksek enerji tüketimi	Havalandırma sistemlerinin yüksek enerji tüketmesi hem karbon salımının hem de maliyetin artmasına yol açmaktadır.	<ul style="list-style-type: none"> Yolcu akışı temiz hava beslemesiyle ilişkili olup havalandırma sisteminin tükettiği enerjiyi etkilemektedir. Kişi sayısı değişken olduğundan CO₂ miktarına göre fan devirleri, dolayısıyla hava debileri kontrol edilerek havalandırma sisteminden optimum verim elde edilirken maliyet tasarrufu da sağlanacaktır. Yüksek fan performansına sahip, atık ısı geri kazanımlı ve yüksek hava filtrasyon teknolojilerine sahip sistemler ile hem enerji verimliliği sağlanırken hem de konfor artırılabilir. Hareket mekanizmalı bir CO₂ sensörünün istasyon içerisinde dolaşarak istasyonun birçok gerekli noktasından ölçüm yapması ile daha detaylı sonuçlar elde edilebilir ve elde edilen havalandırma talebine göre hava debisi ayarlanabilir. Daha önce metro ve tramvay duraklarında elektrik enerjisinin güneş enerjisinden sağlandığı çalışmalar yapılmıştır [72,73]. Metro istasyonlarına kurulabilecek güneş enerji santralleri ile istasyonların elektriği güneşten karşılanarak karbon salımı azaltılmış olacaktır. Metroda güneş enerjisinin termal uygulamalarından da faydalanılabilir. Güneş enerjisinden sıcak hava üretilerek metronun kış mevsimindeki ısıtma yükü karşılanabilir.

Tablo 1'in devamı

Hava kalitesi	Metro ortamında bulunan kirleticilere maruz kalmak uzun vadede çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadır.	<ul style="list-style-type: none"> Sıcaklık, CO₂ vb. değişkenlerin çok noktadan ölçümü ile yük kontrolü hassas bir şekilde yapılarak iç hava kalitesi iyileştirilebilir. Aktif karbon ve zeolitlerle havadaki uçucu organik bileşikler adsorbsiyon yoluyla emilerek iç hava kalitesi iyileştirilebilir. Havalandırma filtrelerinden önce ve sonra partikül madde sensörleri yerleştirilerek havadaki partikül madde seviyesi ölçülerek filtrenin verimli olup olmadığı gözlemlenebilir. Literatürdeki bir çalışmada [74] hava temizleyicilerinin giderim etkinlikleri test edilmiştir. Test sonucuna göre, serbest radikal üreten hava temizleyicisi partikül madde gideriminde en iyi performans gösteren cihaz olmuştur. Bu cihazın metro istasyonlarında kullanılması partikül madde seviyelerinin azalmasını sağlayacaktır. Toz toplayıcı cihazların metro istasyonlarına yerleştirilmesiyle iç hava kalitesinde iyileşme gözlemlenecektir.
---------------	---	---

Bu çalışmada metro ortamının havasındaki kirleticiler ve bu kirleticilerden kaynaklanan sağlık sorunlarının öneminden bahsedilmiş, havalandırma sisteminin çalışma prensibi ile bu sistemin enerji tüketimini etkileyen faktörler incelenmiştir. Havalandırma sistemleri metrodaki enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yeraltında olmasının da getirdiği dezavantajdan dolayı metro havasında yüksek konsantrasyonlarda kirleticiler bulunmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada yüksek enerji tüketimi ve yetersiz hava kalitesi problemlerine çözüm önerileri sunulmuştur. Bu öneriler sayesinde enerji tüketimi ve maliyet azaltılırken aynı zamanda iç hava kalitesi iyileştirilerek karbon salımı da azaltılmış olacaktır.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

ΔP Toplam basınç kaybı, Pa

Δt Yıllık işletim süresi, saat

A_i Serpantin iç yüzeyindeki ısı transfer alanı, m²

A_o Serpantin dış yüzeyindeki ısı transfer alanı, m²

C_o Dış havadaki karbondioksit konsantrasyonu, ppm

C_s Boşluktaki karbondioksit konsantrasyonu, ppm

CO₂

Karbondioksit

CO

Karbonmonoksit

COP

Etkinlik katsayısı

D_i

Serpantin iç çapı, m

D_o

Serpantin dış çapı, m

h_i

Serpantin iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı, W/m²K

h_o

Serpantin dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı, W/m²K

k

Isıl iletkenlik katsayısı, W/mK

L

Kalınlık, m

$R_{f,o}$

Serpantin dış yüzey kirlilik faktörü

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)

Yaren GÜVEN: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted research of article and performed the writing process.

Mustafa AKTAŞ: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted research of article 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] Üser, Y., Yalçın, M. A., Özen, Ş. (2004). Endüstride Yüksek Verimli Motor Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkileri. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 55-61.
- [2] Kim, J. Y., Kim, K. Y. (2009). Effects of Vent Shaft Location on the Ventilation Performance in a Subway Tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 97, 174-179.
- [3] Moreno, T., Pérez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Gibbons, W. (2014). Subway Platform Air Quality: Assessing the Influences of Tunnel Ventilation, Train Piston Effect and Station Design. Atmospheric Environment, 92, 461-468.
- [4] Chatterjee, A., Zhang, L., Xia, X. (2015). Optimization of Mine Ventilation Fan Speeds According to Ventilation on Demand and Time of Use Tariff. Applied Energy, 146, 65-73.
- [5] Quan, J., Kim, S. H., Kim, J. H. (2018). A Study on Probabilistic Social Cost-Benefit Analysis to Introduce High-Efficiency Motors into Subway Station Ventilation. Energy Policy, 121, 92-100.
- [6] Guan, B., Zhang, T., Liu, X. (2018). Performance Investigation of Outdoor Air Supply and Indoor Environment Related to Energy Consumption in Two Subway Stations. Sustainable Cities and Society, 41, 513-524.
- [7] Zhang, Y., Li, X. (2018). A Study of Fresh Air Control in Subway Stations. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 175, 384-390.
- [8] Liu, M., Zhu, C., Zhang, H., Zheng, W., You, S., Campana, P. E., Yan, H. (2019). The Environment and Energy Consumption of a Subway Tunnel by the Influence of Piston Wind. Applied Energy, 246, 11-23.
- [9] Li, G., Meng, X., Zhang, X., Zhang, L., Du, C., Li, N., Yu, W., Xiong, J., Zhang, S., Li, B. (2020). An Innovative Ventilation System Using Piston Wind for the Thermal Environment in Shanghai Subway Station. Journal of Building Engineering, 32, 101276.
- [10] Su, Z., Li, X. (2020). Sub-System Energy Model Based on Actual Operation Data for Subway Stations. Sustainable Cities and Society, 52, 101835.
- [11] He, D., Teng, X., Chen, Y., Yuan, Y., Li, X., Shan, S. (2021). Piston Wind Characteristic and Energy Saving of Metro Station Environmental Control System. Journal of Building Engineering, 44, 102664.
- [12] Yu, Y., You, S., Zhang, H., Ye, T., Wang, Y., Wei, S. (2021). A Review on Available Energy Saving Strategies for Heating, Ventilation and Air Conditioning in Underground Metro Stations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110788.
- [13] Cheng, F., Cui, C., Cai, W., Zhang, X., Ge, Y., Li, B. (2022). A Novel Data-Driven Air Balancing Method with Energy-Saving Constraint Strategy to Minimize the Energy Consumption of Ventilation System. Energy, 239, 122146.
- [14] He, D., Teng, X., Chen, Y., Liu, B., Wang, H., Li, X., Ma, R. (2022). Energy Saving in Metro Ventilation System Based on Multi-Factor Analysis and Air Characteristics of Piston Vent. Applied Energy, 307, 118295.
- [15] Su, Z., Li, X. (2022). Analysis of Energy-Saving for Ventilation and Air-Conditioning System of Subway Stations with Platform Screen Doors. Journal of Building Engineering, 59, 105064.

- [16] Yang, J., Liu, M., Zhang, H., Zheng, W., You, S., Cui, T. (2022). Ventilation and Energy Performance Study on Platform Screen Doors with Adjustable Vents in a Subway Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104291.
- [17] Bae, S., Kim, J., Yun, J. J. (2015). Energy Efficient Blower Control Strategy for the Ventilation System of a Metropolitan Subway Station. *Indian Journal of Science and Technology*, 8, 1-6.
- [18] Liddament, M. (2015). Thermal Response and Plant Sizing. *CIBSE Guide A Environmental Design*.
- [19] Doğan, H. (2018). Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Esasları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 241-244.
- [20] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 (2013). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, Atlanta, GA, USA.
- [21] Abanoz, M. S. (2019). “İstanbul’da Metroların İç Hava Kalitesine Havalandırma Sistemlerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Ryu, K. J., Juraeva, M., Jeong, S. H., Song, D. J. (2012). Ventilation Efficiency in the Subway Environment for the Indoor Air Quality. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Systems Engineering*, 3, 549-553.
- [23] Nieuwenhuijsen, M. J., Gómez-Perales, J. E., Colvile, R. N. (2007). Levels of Particulate Air Pollution, Its Elemental Composition, Determinants and Health Effects in Metro Systems. *Atmospheric Environment*, 41, 7995-8006.
- [24] Passi, A., Nagendra, S., Maiya, M. P. (2021). Characteristics of Indoor Air Quality in Underground Metro Stations: A Critical Review. *Building and Environment*, 198, 107907.
- [25] Bernstein, J. A., Alexis, N., Bacchus, H., Bernstein, I. L., Fritz, P., Horner, E., Li, N., Mason, S., Nel, A., Oullette, J., Reijula, K., Reponen, T., Seltzer, J., Smith, A., Tarlo, S. M. (2008). The Health Effects of Nonindustrial Indoor Air Pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121, 585-591.
- [26] Wang, Y., Li, J., Li, X. (2017). Subway Simulation of CO₂ Concentration During Close Mode Operation. *Sustainable Cities and Society*, 28, 201-208.
- [27] ASHRAE, Standard 62 (1989). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [28] ASHRAE Handbook (2003). HVAC Applications, ASHRAE.
- [29] İnternet: Beyfan, “Havalandırmanın Önemi ve Gerekliliği”. URL: <https://www.havalandirmafanlari.com/havalandirmanin-onemi>.
- [30] İnternet: AEM Laboratuvarı, “VOC (Uçucu Organik Bileşik) Nedir? VOC Ölçümü”. URL: <https://www.aem.com.tr/voc-ucucu-organik-bilesik-nedir-voc-olcumu/>.
- [31] Zenz, C. (1988). Occupational Medicine: Principles and Practical Applications. ABD: Year Book Medical Publishers.
- [32] Vallero, D. (2014). Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, ABD, 197-214.
- [33] Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M. C., Amato, F., Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X. (2015). Exposure to Airborne Particulate Matter in the Subway System. *Science of The Total Environment*, 511, 711-722.
- [34] Park, J. H., Son, Y. S., Kim, K. H. (2019). A Review of Traditional and Advanced Technologies for the Removal of Particulate Matter in Subway Systems. *Indoor Air*, 29, 157-363.
- [35] Martins, V., Moreno, T., Mendes, L., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Alves, C. A., Duarte, M., Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X., Minguillón, M. C. (2016). Factors Controlling Air Quality in Different European Subway Systems. *Environmental Research*, 146, 35-46.

- [36] Morrow, P. E. (1964). Evaluation of Inhalation Hazards Based Upon the respirable Dust Concept and the Philosophy and Application of Selective Sampling. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 25, 213-236.
- [37] ASHRAE, Standard 62 (2001). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [38] Karlsson, H. L., Nilsson, L., Möller, L. (2005). Subway Particles Are More Genotoxic than Street Particles and Induce Oxidative Stress in Cultured Human Lung Cells. *Chemical Research in Toxicology*, 18, 19-23.
- [39] Bates, D. (1992). Health Indices of the Adverse Effects of Air Pollution: The Question of Co-herence. *Environmental Research*, 59, 336-349.
- [40] Weaver, L., Hopkins, R., Chan, K., Churchill, S., Elliott, C., Clemmer, T. (2002). Hyperbaric Oxygen for Acute Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347, 1057-67.
- [41] Aydın, F. (2013). Combine to the Ventilation Systems for Passengers and Tunnel Areas in Metro Systems, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu, Karabük, Türkiye.
- [42] Özbakır, E. (2007). Yeraltı Raylı Sistem İstasyonlarında Isıtma, Havalandırma, Klima Tesisatı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 97, 375-382.
- [43] NFPA-130, (2010), Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, USA.
- [44] Leng, J., Wen, Y. (2021). Environmental Standards for Healthy Ventilation in Metros: Status, Problems and Prospects. *Energy & Buildings*, 245, 111068.
- [45] Neccar Ö. (2007). Üsküdar-Ümraniye Metro Projesi Mekanik Hesap Raporu. 7A Mühendislik, 30-43, İstanbul.
- [46] Akgül Laloğlu, Ş. (2010). "Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Sistemi Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [47] İnternet: Aironn, "Metro ve Demiryolu Havalandırma Sistemleri". URL: <https://www.aironn.com.tr/cozumler/metro-ve-demir-yolu-havalandirma-sistemleri>.
- [48] İnternet: Cvsair, "Metro Fanı-Ürün Özellikleri". URL: <https://cvsair.com.tr/metro-fani/>.
- [49] Cheng, G., Qi, M., Zhang, J., Wang, W., Cheng, Y. (2012). Analysis of the Stability of the Ventilation System in Baishan Coalmine. *Procedia Engineering*, 45, 311-316.
- [50] Acuña, E., Hall, S., Hardcastle, S., Fava, L. (2010). The Application of a MIP Model to Select the Optimum Auxiliary Fan and Operational Settings for Multiple Period Duties. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2, 95-102.
- [51] Eliason, J. R., Fisher, B. S. (1977). Large Adjustable Speed Fan Drives Including Static Converter Developments for Cement Plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 6, 557-562.
- [52] Liu, H., Lee, S. C., Kim, M. J., Shi, H., Kim, J. T., Wasewar, K. L., Yoo, C. K. (2013). Multi-Objective Optimization of Indoor Air Quality Control and Energy Consumption Minimization in a Subway Ventilation System. *Energy and Buildings*, 66, 553-561.
- [53] Doğan, H. (2017). Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Tekniği, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 280-281.
- [54] Canbazoğlu, S. (2020). Fan Mühendisliği, Doğa Yayıncılık, İstanbul, 233-243.
- [55] Bulgurcu, H. (2015). Havalandırma Tesisatı, Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [56] İnternet: International Electrotechnical Commission, "Electric Motors". URL: <https://www.iec.ch/government-regulators/electric-motors>.
- [57] Zöhra, B., Akar, M. (2019). Türkiye'de Verimli Elektrik Motorlarına Geçiş Süreci ve Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron

- Motorlar. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 3, 236-242.
- [58] Aktaş, M., Durak, V., Tanrıku, Z. B., Güler, M., Gökben, D. (2023). Akışkan Yatak Kum Kurutma Sisteminde Fan Performansının Kurutm Maliyetine Etkisinin Araştırılması. 9th International Baskent Congress on Life, Engineering and Applied Sciences, Ankara, Türkiye, 86-87.
- [59] İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri". URL: <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri#:~:text=Son%20olarak%2C%20elektrik%20t%C3%BCketim%20noktas%C4%B1,2%2De%2C%20sera%20gaz%C4%B1%20emisyonu>.
- [60] İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Enerjini Boşa Harcama". URL: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/samsun/webmenu/webmenu4374.pdf>.
- [61] EUROVENT 4/11, Energy Efficiency Classification of Air Filters for General Ventilation Purposes, Paris, France.
- [62] Gürdallar, M. (2004). Hijyen ve İç Hava Kalitesi Bakımından HVAC Sistemlerinin Temizliği. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 82, 20-32.
- [63] İnternet: Dağsan Havalandırma, "Hava Kanalları". URL: <https://www.dagsanhavalandirma.com/urundetay/hava-kanallari>.
- [64] Çengel, Y. A. (2011). Isı ve Kütle Transferi, Güven Kitabevi, İzmir, 615-617.
- [65] Delwati, M., Merema, B., Breesch, H., Helsen, L., Sourbron, M. (2018). Impact of Demand Controlled Ventilation on System Performance and Energy Use. Energy and Buildings, 174, 111-123.
- [66] Murphy, J., Ap, L., Bradley, B. (2005). CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation with ASHRAE Standard 62.1-2004. Engineers Newsletter, 34, 1-8.
- [67] Schell, M. B., Turner, S. C., Omar, S. (1998). Application of CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation, ASHRAE Transactions, 104, 1213-1225.
- [68] Kim, T. H., Choi, B. H., Kang, M. S., Lee, H. J. (2021). Removal of Iron Oxide from Indoor Air at a Subway Station Using a Vegetation Biofilter: A Case Study of Seoul, Korea. Atmosphere, 12, 1463.
- [69] Son, Y. S., Oh, Y. H., Choi, I. Y., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J. H., Park, D., Kim, J. C. (2019). Development of A Magnetic Hybrid Filter to Reduce PM10 in A Subway Platform. Journal of Hazardous Materials, 368, 197-203.
- [70] Zhao, L., Wang, J., Gao, H. O., Xie, Y., Jiang, R., Hu, Q., Sun, Y. (2017). Evaluation of Particulate Matter Concentration in Shanghai's Metro System and Strategy for Improvement. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 53, 115-127.
- [71] Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., Capdevila, M., de Miguel, E., Querol, X. (2017). The Effect of Ventilation Protocols on Airborne Particulate Matter in Subway Systems. Science of the Total Environment, 584-585, 1317-1323.
- [72] İnternet: Metro İstanbul, "Enerjisini Kendi Üreten İstasyon". URL: <https://www.metro.istanbul/haber/detay/enerjisini-kendi-ureten-istasyon>.
- [73] İnternet: Bursa Büyükşehir Belediyesi, "Metro Durakları Enerji İstasyonuna Dönüyor". URL: <https://www.bursa.bel.tr/haber/metro-duraklari-enerji-istasyonuna-donuyor--29786>.
- [74] Babaei, P., Ögün, E., Güllü, G. (2017). Farklı Türdeki Hava Temizleme Cihazlarının Partikül Madde ve Formaldehit Giderim Etkinliklerinin Kıyaslanması. VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, 823-829, Antalya, Türkiye.

Ağır Ticari Araç Süspansiyon Sistemleri için Modüler Taşıyıcı Kol Mekanizmasının Tasarımı ve Analizi

Kayhan ALTINEL¹, Ahmet YILDIZ², Celalettin YUCE^{2*}

¹NSK Otomotiv Tasarım Merkezi, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/02/2023
Düzeltilme: 05/07/2023
Kabul: 05/07/2023

Anahtar Kelimeler

Taşıyıcı Kol
Sonlu Elemanlar Analizi
Ticari Araç
Süspansiyon

Article Info

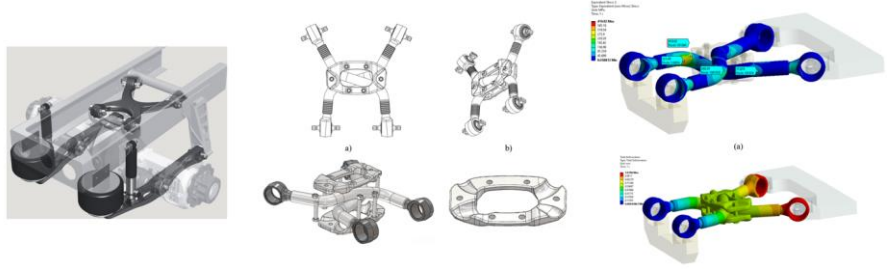
Research article
Received: 01/02/2023
Revision: 05/07/2023
Accepted: 05/07/2023

Keywords

Support Arm
Finite Element Method
Commercial Vehicle
Suspension

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada ticari araç süspansiyon sistemlerinin önemli bir bileşeni olan x-kol yapısına alternatif olarak performans ve güvenlikten ödün vermeden yenilikçi tasarıma sahip çok komponentli bir yapının tasarımı ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan yeni tasarımda gerilmelerin emniyetli alanda kaldığı görülmüştür. / In this study, as an alternative to the x-arm structure, which is an important component of commercial vehicle suspension systems, the design and finite element analysis of a multi-component structure with an innovative design without sacrificing performance and safety were carried out. In the new design that emerged, it was observed that the stresses remained in the safety limits.



Şekil A: Modüler taşıyıcı kol mekanizmasının tasarımı ve analizi /Figure A: Design and analysis of modular support arm mechanism

Önemli Noktalar (Highlights)

- Ticari araçlar için performans ve güvenlikten ödün vermeden yenilikçi tasarıma sahip çok komponentli bir taşıyıcı kol tasarlanmıştır. / A multi-component support arm with an innovative design has been designed for commercial vehicles without sacrificing performance and safety.
- Geliştirilen çok komponentli taşıyıcı kolun tasarımında üretim prosesi de göz önüne alınarak boru ve birleştirme komponentlerinden faydalanılmıştır. / In the design of the developed multi-component support arm, pipe and joint components were used, taking into account the production process.
- Yeni taşıyıcı kol yapısı ile olası bir hasar durumunda komple taşıyıcı kolun değiştirilmesi yerine hasarlı parçanın çok daha kısa zamanda ve düşük maliyetle değiştirilmesi amaçlanmıştır. / With the new support arm structure, it is aimed to replace the damaged part in a much shorter time and at low cost, instead of replacing the entire part in case of possible damage.

Amaç (Aim): Aks (diferansiyel) ve şasiyi birbirine bağlayan taşıyıcı yapısı analiz edilmiş ve alternatif olarak ayırık boru yapılı bir sistem tasarlanmıştır. / The support structure connecting the axle (differential) and the chassis was analyzed and a split-pipe system was designed as an alternative.

Özgünlük (Originality): Boru malzemesinden üretilmiş iki adet bugi kolunun X formu montaj flanş parçaları ile birleştirilmesiyle bir taşıyıcı kol oluşturulmuştur. / A support arm is formed by combining two coil arms made of pipe material with X-shaped mounting flange parts.

Bulgular (Results): Gerilmelerin parçadaki belirli bir bölgede yoğunlaştığı ve parçanın genel itibari ile emniyetli alanda kaldığı görülmüştür. / It has been observed that the stresses are concentrated in a certain region of the part and the part is generally in the safe area.

Sonuç (Conclusion): Yeni çok kollu tasarımda aynı çalışma şartlarında yeterli mukavemet sağlanmış ayrıca parçalı yapısı sayesinde kırılma durumunda ilgili parçanın değiştirilmesine imkan sağlanmıştır. / In the new multi-arm design, sufficient strength is provided under the same operating conditions, and thanks to its fragmented structure, it is possible to replace the relevant part in case of breakage.



Ağır Ticari Araç Süspansiyon Sistemleri için Modüler Taşıyıcı Kol Mekanizmasının Tasarımı ve Analizi

Kayhan ALTINEL¹ , Ahmet YILDIZ² , Celalettin YUCE^{2*} 

¹NSK Otomotiv Tasarım Merkezi, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/02/2023
Düzeltilme: 05/07/2023
Kabul: 05/07/2023

Anahtar Kelimeler

Taşıyıcı Kol
Sonlu Elemanlar Analizi
Ticari Araç
Süspansiyon

Öz

Ticari araçların önemli bir parçası olan süspansiyon sistemlerini ana görevi; iyi bir sürüş ve yol tutuş performansı sağlamak, dönüş esnasında direksiyon kontrolü sağlamak ve taşıtın kontrol kuvvetlerine iyi yanıt vermektir. Bu nedenle ticari araçların sürüş güvenliğinin ve konforunun sağlanması ön düzen ve süspansiyon sistemlerinin uyumlu ve sorunsuz çalışması ile ilişkilidir. Taşıtlarda sürüş güvenliği ve konforunun sağlanması ön düzen ve süspansiyon sistemlerinin uyum içinde çalışmasına bağlıdır. Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan süspansiyon sistemlerinde aks (diferansiyel) ve şasiyi birbirine bağlayan klasik X-kol yapısı analiz edilmiş ve bu parçaya alternatif olarak ayrı bir boru yapılı bir sistem tasarlanarak onlu elemanlar analizi ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Mevcutta var olan sistemde kırılma yaşayabilmekte, bu durumda da parçanın tamamen değiştirilmesi gerekmektedir. Yeni çok kollu tasarımda aynı çalışma şartlarında yeterli mukavemet sağlanmış ayrıca parçalı yapısı sayesinde kırılma durumunda ilgili parçanın değiştirilmesine imkan sağlanmıştır.

Design and Analysis of Modular Support Arm Mechanism for Heavy Commercial Vehicle Suspension Systems

Article Info

Research article
Received: 01/02/2023
Revision: 05/07/2023
Accepted: 05/07/2023

Anahtar Kelimeler

Support Arm
Finite Element Method
Commercial Vehicle
Suspension

Abstract

The main task of suspension systems, which is an important part of commercial vehicles; to provide a good driving and handling performance, to provide steering control during turning and to respond well to the control forces of the vehicle. For this reason, ensuring the driving safety and comfort of commercial vehicles is related to the harmonious and trouble-free operation of the front arrangement and suspension systems. Ensuring driving safety and comfort in vehicles depends on the front arrangement and suspension systems working in harmony. In this study, the classical X-arm structure connecting the axle (differential) and chassis in suspension systems used in heavy commercial vehicles has been analyzed and as an alternative to this part, a split-pipe system has been designed and verified by decal element analysis. There may be damage to the existing system, and in this case, the part must be completely replaced. In the new multi-arm design, sufficient strength is provided under the same operating conditions, and thanks to its modular structure, it is possible to replace the relevant part in case of breakage.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağır ticari araçlarda iyi bir yol tutuşu ve sürüş performansının sağlanabilmesi, dönüş esnasında direksiyon kontrolünün sağlanabilmesi ve yol üzerinden gelen hareketleri ve taşıta etkiyen kuvvetleri süspansiyon sisteminin absorbe etmesi beklenmektedir. Günümüzde aktif süspansiyon sistemlerinden ilk model olan sabit akslı sistemlere

kadar birçok farklı türdeki süspansiyon sistemleri ticari araçlarda kullanılmaktadır. Bu süspansiyon sistemlerinde aks (diferansiyel) ile şasinin birbirine bağlanmasında özel yapılar kullanılmaktadır. Kamyon, tır gibi ağır ticari araçlarda aks ile şasinin bağlantısı X-kol olarak adlandırılan ve genellikle döküm yöntemi ile tek bir parça olarak üretilen bağlantı parçaları ile sağlanmaktadır. Ticari aracın yol şartlarında kullanımında ortaya çıkan yüksek

frekanstaki titreşimlerde veya taşıtın sert bir kasisten geçmesi gibi durumlarda bu taşıyıcı kol üzerinde hasar oluşumu gözlenmektedir.

Literatürde ağır vasıta araçların süspansiyon sistemlerindeki farklı parçalarının yol şartlarındaki gerilme durumları analiz edilerek ürün doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda taşıtların muhtelif yerlerinde kullanılan parçaların maksimum gerilme analizleri, yorulma dayanımları, deformasyonları ve titreşim analizleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [1-4]. Sonlu elemanlar analizi sayesinde, parçaların tasarımlarını optimize etmek mümkün olmaktadır. Ayrıca analiz sonuçlarına dayanarak, parçanın mukavemetini artırmak veya ağırlığını azaltmak gibi tasarım değişiklikleri mümkün olabilmektedir. Avikal ve ark. [5], bir ağır hizmet kamyonunun ön aks kirişini 3 boyutlu modellemiş ve daha sonra sonlu elemanlar metodu yardımıyla aks kirişinin yorulma ömür analizlerini gerçekleştirmiştir. Chandra ve ark. [6] polimerik kompozit malzemeden imal edilen ağır vasıta şasisinin üç farklı kesit ile modellenmesi ve yapısal analizi ile ilgilenmiş ve farklı malzeme durumlarında şekil değişikliklerini sonlu elemanlar metodu ile tespit etmişlerdir. Yine benzer bir çalışmada Ashok [7] ağır ticari araçların şase yapısının sonlu elemanlar metodu ile analizini gerçekleştirmiş ve iç yapısının bal peteği şeklinde olması durumunda karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Agarwal ve ark. [8] yine ağır ticari araç şasisinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini yapmış ve optimum alan doldurma ile şasi kütlelerinde yaklaşık %4,35'lik bir azalma elde etmişlerdir.

Lv ve ark. [9] süspansiyon bileşenlerini, sürtünme ve boşluk bağlantılarını da dikkate alarak daha ideal bir araç tasarımı için sonlu elemanlar analizi ve deneysel testlerle incelemişlerdir. Llopis-Albert ve ark. [10] bir taşıt süspansiyon sisteminde dört çubuklu bir mekanizmaya dayalı çift salıncaklı araç süspansiyon sistemini optimize etmişlerdir. Çalışmada bilgisayar destekli tasarım programları ile sonlu eleman analizi kullanılarak süspansiyon tertibatının çok gövdeli kinetiği ve dinamiğini incelemişlerdir. Topaç ve ark. [11] ağır ticari araçlarda kullanılan süspansiyon taşıyıcı muhafaza gövdesini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Muhafaza malzemesinin mekanik özelliklerini çekme testleri ile belirlemişler ve bu verileri kullanılarak gerilme ve yorulma analizleri yapmışlardır. Bir diğer çalışmada Özmen ve ark. [12] bir kamyonunda sönüm oranının kabin süspansiyon döner kolunun arıza eğilimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araçta standart yük durumlarında ön süspansiyon yaylarında meydana

gelen yer değiştirmeler dikkate alınarak süspansiyon bağlantı parçasının topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Gupta ve ark. [13] çift salıncaklı süspansiyon sisteminin alt ve üst salıncaklı tutan direksiyon mafsalın sonlu elemanlar modelini oluşturup analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Belirlenen şekilde elde edilen yer değiştirme ve gerilmeleri inceleyip parçanın üretilebilirliğini göstermişlerdir. Shaikh ve ark. [14] ağır ticari araçlarda, çoklu akslar arasında yükü aktarmak ve dengelemek için kullanılan süspansiyon elemanlarının farklı geometriler için yorulma analizlerini sonlu eleman analizi analizleri ile gerçekleştirmişlerdir. Pachapuri ve ark. [15] kritik yüklenme koşullarında dört tekerlekli bir aracın alt süspansiyon koluna etki eden kuvvetleri hesaplanmıştır. McPherson tipi süspansiyon sistemi için sonlu elemanlar analizi ile araç hareket halindeyken maksimum sapmalar ve gerilim dağılımları belirlenmiş yorulma ve doğal frekans analizleri yapılmıştır. Ayrıca, alt salıncakın topoloji optimizasyonu gerçekleştirilerek ağırlıkta azaltma sağlanmıştır.

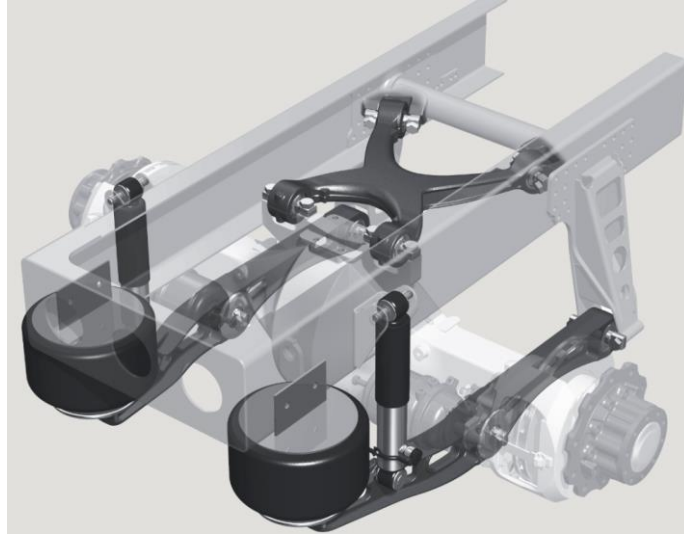
Yapılan literatür araştırmasında da görüldüğü gibi taşıt parçalarının sonlu elemanlar modelleri yardımı ile gerçek çalışma şartlarındaki yüklenme durumları simule edilerek analizlerinin gerçekleştirilmesi sayesinde ürün doğrulama çalışmalarının hem hızlı hem de düşük maliyette gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Ancak taşıyıcı parça olarak kullanılan bu yapıların tasarımları genelde yekpare olarak oluşturulmakta ve döküm yöntemi ile üretilmektedir. Bu durum olası hasar durumlarında ürünün kompleksinin değişmesine neden olarak maliyet artışına neden olmaktadır. Bu çalışmanın en önemli özgülüğü, mevcut x-kol yapısına alternatif olarak performans ve güvenlikten ödün vermeden yenilikçi tasarıma sahip çok komponentli bir yapının tasarımı ve sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Patentlenmiş yeni tasarımın mevcut yapı ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Kamyon, tır gibi ağır ticari araçlarda aks ile şasinin bağlantısını sağlayan geleneksel X-kol yapılanmaları genellikle sfero döküm yöntemi ile tek bir parça olarak üretilmekte ve ostemperleme ısı işlemi uygulanarak istenilen sertlik değerlerine çıkarılmaktadır. Şekil 1'de X-kol yapısının araç üzerindeki yerleşimi gösterilmiştir. Tek parça olarak üretilen bu kollar aracın kullanımı esnasında titreşim ve ani darbeler neticesinde hasara

uğrayarak kopma ve/veya kırılma yaşanmaktadır (Şekil 2). Hasar durumunda bu yapının komple araç üzerinden sökülmesi ve değiştirilmesi

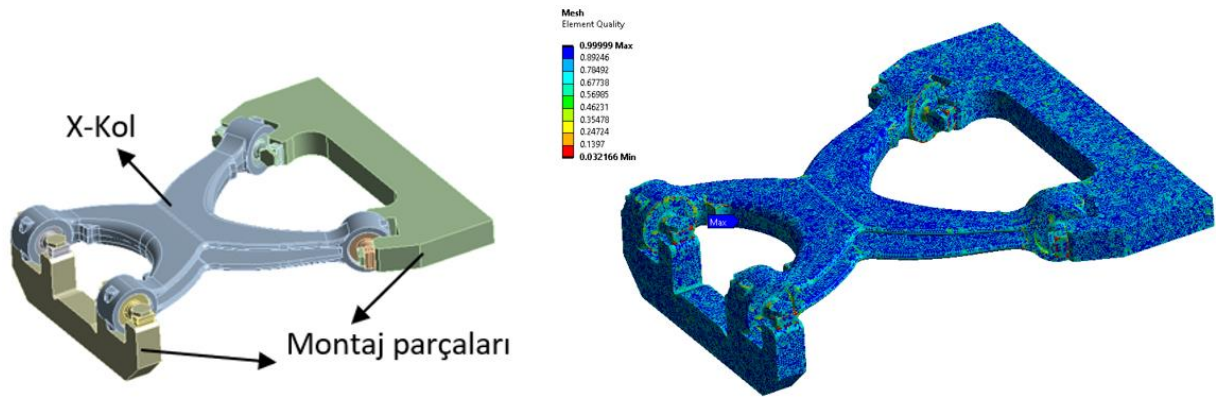
gerekmektedir. Bu durumda hem maliyet hem de zaman kaybı yaşanmaktadır.



Şekil 1. Geleneksel X-kol mekanizmasının araç üzerindeki yerleşimi (Placement of the traditional X-arm mechanism on the vehicle)



Şekil 2. Mevcut X-kol yapısında görülen kırılma durumları (Fracture states seen in the existing X-arm structure)



Şekil 3. Mevcut X-kol yapısının sonlu elemanlar modeli (Finite element model of current X-arm structure)

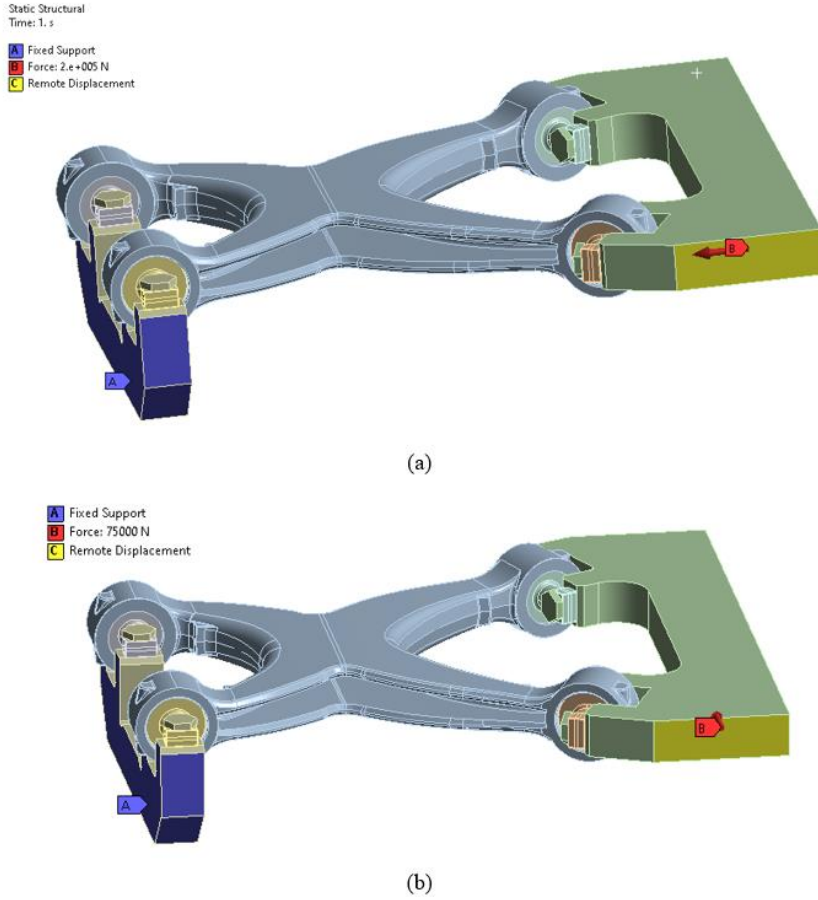
Bu çalışma kapsamında öncelikle mevcut X-kol yapısı çalışma şartlarında analiz edilmiştir. Mevcut X kolun araca montajlandığı ek parça da dikkate alınarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Kurulan sonlu elemanlar modelinde mesh yapısı

1895865 nokta ve 1309096 elemandan oluşmaktadır (Şekil 3).

Bu çalışmada iki farklı senaryoya göre analizler gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda X-kol araç aksına bağlantısı olan noktalardan sabitlenerek

şasiden parça üzerine gelen 200 kN'luk bir yük modellenmiştir. İkinci senaryoda ise aracın tekerleklerinden biri çukura veya tümseğe girip-çıkıldığında şasiden aksa doğru oluşacak yanal yükler simule edilmiştir. Bu durum için de 75 kN'luk bir yükleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te görülen

mavi renkli montaj parçası tüm doğrultularda hem ötelenme hem de dönme hareketi engellenecek şekilde sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Diğer montaj parçasından ise ilgili senaryo için gerekli yük uygulanmıştır.



Şekil 4. Mevcut X-kol yapısında uygulanan sınır şartları a) birinci senaryo, b) ikinci senaryo (yanal yük)
(Boundary conditions applied in the existing X-arm structure a) first scenario, b) second scenario (lateral load))

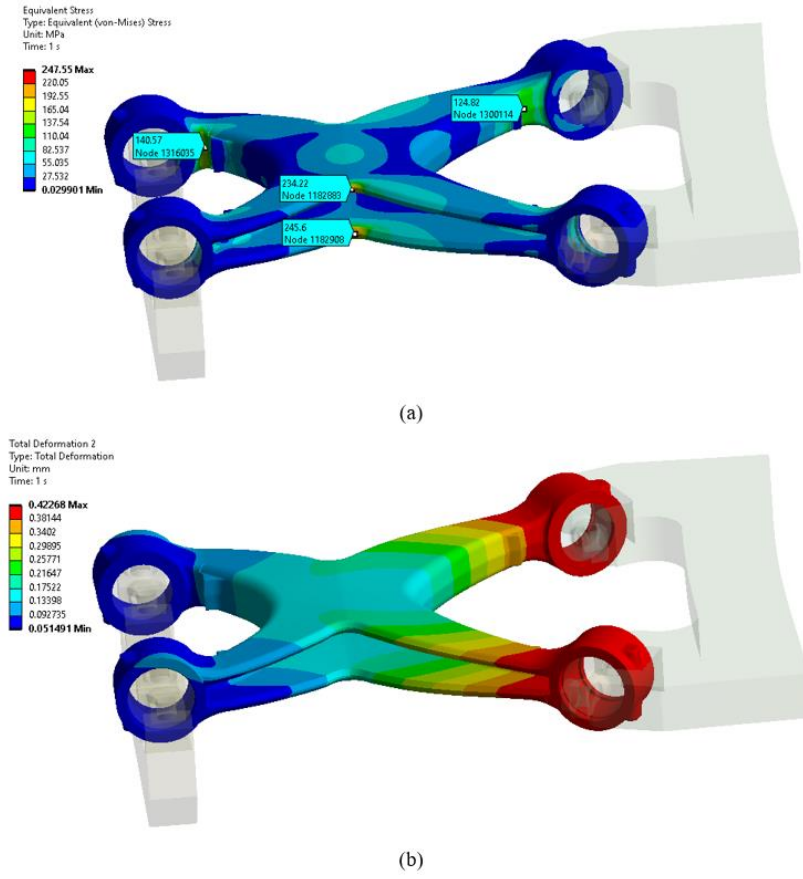
3.BULGULAR (RESULTS)

Yapılan analiz sonucunda birinci senaryo olan 200 kN'luk yükleme altında X-kol üzerindeki oluşan gerilme dağılımları ve toplam deformasyon Şekil 5'te verilmiştir. Parça üzerinde en yüksek eşdeğer gerilme 247 MPa ile orta kısımda gözlenmiştir

(Şekil 5a). Toplam deformasyon değeri ise bu yükleme koşulu için 0.42 mm olarak kuvvetin etki ettiği bağlantı kulaklarında gözlenmiştir (Şekil 5b). Oluşan eşdeğer gerilme parçanın üretiminde kullanılan sfero döküm GGG 60 malzemenin akma sınırı olan 370 MPa'nın oldukça altında kalmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Mevcut ve yeni malzemenin mekanik özellikleri [16,17] (Mechanical properties of existing and new material)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama (Min.)
GGG60	350	430	8.7
P460	450	570	17



Şekil 5. Mevcut X-kol yapısı birinci senaryo analiz sonuçları a) eşdeğer gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon miktarı (Existing X-arm structure first scenario analysis results a) equivalent stress distribution, b) total amount of deformation)

Yanal yükleme durumunun analiz edildiği ikinci senaryoda parça üzerinde oluşan gerilme dağılımları ve toplam deformasyon Şekil 6'da verilmiştir. 75 kN'luk yanal yük altında parça üzerinde en yüksek eşdeğer gerilme parçanın araca bağlandığı üst kulakta 130 MPa olarak gözlemlenmiştir (Şekil 6a). Parçanın geneli incelendiğinde oluşan gerilmelerin parçanın akma dayanımının altında kaldığı görülmüştür. Toplam deformasyon değeri ise bu yükleme koşulu için 0.29 mm olarak kuvvetin etki ettiği bağlantı kulaklarında gözlenmiştir (Şekil 6b).

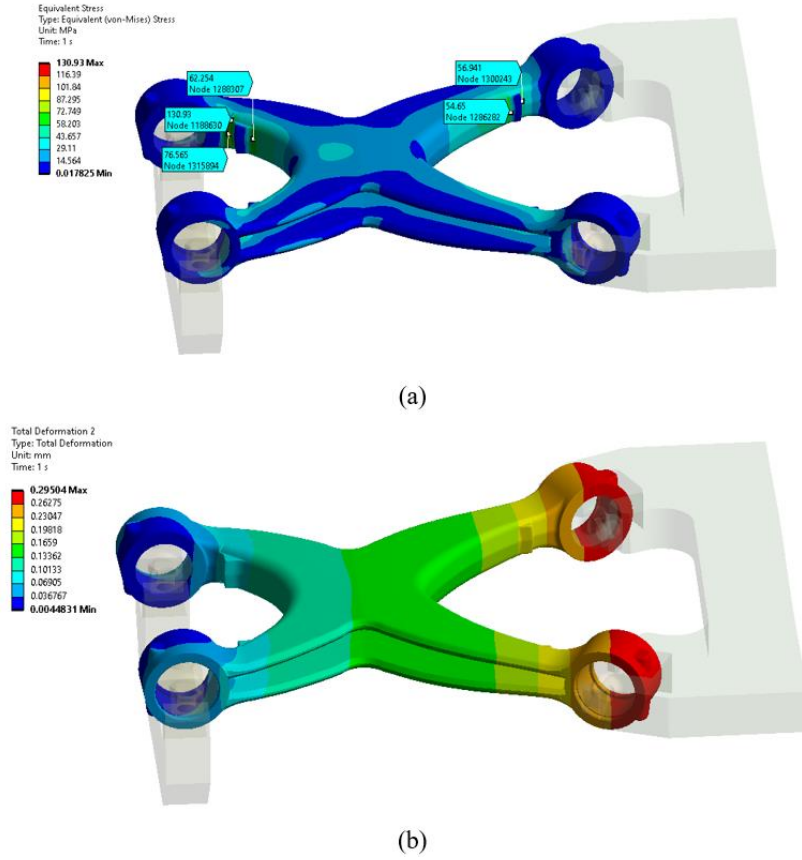
Yapılan analizler sonucunda mevcut X-kol yapısının her iki senaryoda da üzerinde oluşan gerilmeleri emniyetli bir şekilde taşıdığı gözlenmiştir. Ancak, mevcutta kullanılan taşıyıcı kollarında aracın şasisine gelen ani yüklemelerde hasarlar yaşanmakta ve kırılmalar yaşanmaktadır. Döküm yöntemi ile tek parça olarak üretilen bu taşıyıcı kollarında yaşanan hasarlarda kolun tamamı değişmek zorunda olduğundan maliyetler artmaktadır. Olası hasar durumunda komple X-kol değişimi yerine hasarlı kısmın değişmesine olanak sağlamak ve bu sayede kullanıcılar açısından değişimin sebep olduğu maliyet artışını azaltmak, değişim sırasında montaj işleminin kolay

yapılmasını sağlamak için tasarımında yeniliğe gidilmiştir.

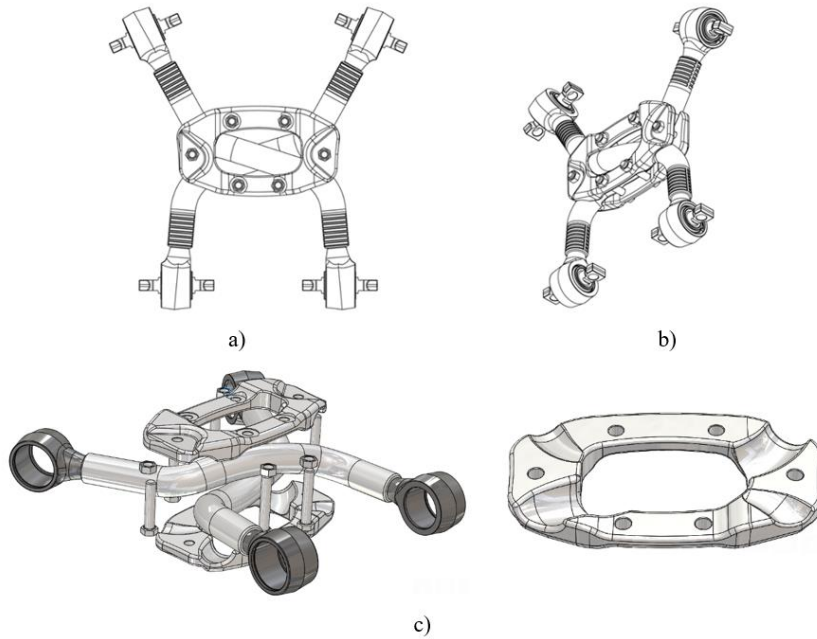
Yenilikçi bir tasarım anlayışı ile çok komponentli bir taşıyıcı kol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarımda boru malzemesinden üretilmiş iki adet bugi kolunun X formlu montaj flanş parçaları ile birleştirilmesiyle bir taşıyıcı kol oluşturulmuştur. Taşıyıcı kola ait tamir takımlarının aynı düzlemde kalabilmesi için, kolda bulunan borulara özel bükümlü şekil verilerek birbirileri ile tek bir yatay eksen oluşturması sağlanmıştır. Ortaya çıkan çok komponentli kolun üretim süreci mevcutta kullanılan döküm yöntemi ile üretilen üründen tamamen farklı olarak, boruların bükülüp form verilmesi ve birleştirme komponentlerinin kullanılmasıyla sağlanmıştır. Kullanım esnasında yüklemeye gözlemlenen değişimlerin, parçaların birbiri üzerindeki olası izafi hareketini engellemesi ve bağlantı rijitliğini sağlayabilmesi için borular alt ve üst plaka üzerinde bulunan kanallardan geçecek şekilde tasarlanmıştır. Dolayısı ile cıvata somunlar ile borular bu kanalda sıkıştırılıp hapsedilmektedir. Herhangi bir ayrılma söz konusu olmamaktadır. Bükümlü borular ve plakalar tek parça olup simetriklerdir. Çok komponentli taşıyıcı kolun CAD datası Şekil 7'de verilmiştir. Döküm yapısından

boru malzemesinden üretilmiş iki adet buğı kolunun X formlu montaj flanş parçaları ile birleştirilmesiyle geliştirilen bu parçada malzeme olarak P460 çelik

malzeme tercih edilmiştir. Söz konusu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



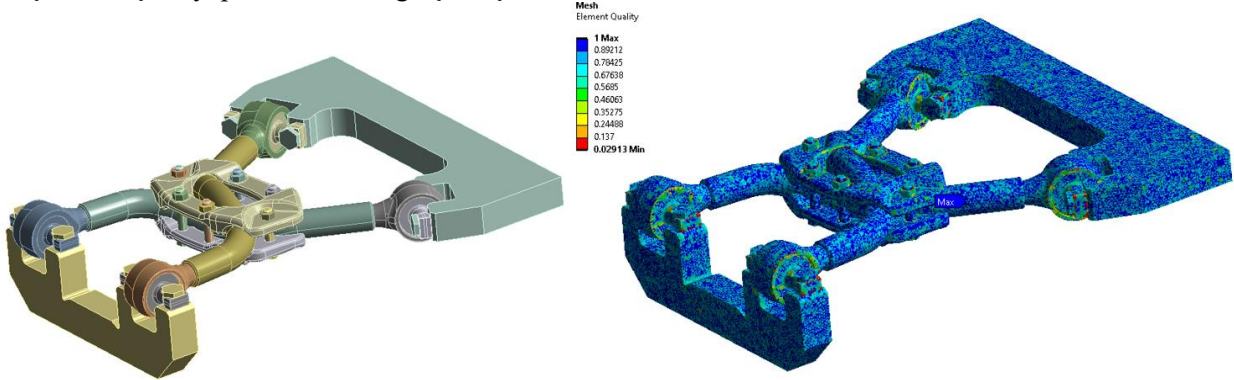
Şekil 6. Mevcut X-kol yapısı birinci senaryo analiz sonuçları a) eşdeğer gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon miktarı (Existing X-arm structure first scenario analysis results a) equivalent stress distribution, b) total amount of deformation)



Şekil 7. Çok komponentli taşıyıcı kolun a) üstten görünüşü, b) üst yan profilden görünüşü, c) patlatılmış görüntüsü (a) top view, b) top side profile view, c) exploded view of the multi-component carrier arm)

Geliştirilen yeni tasarım çok komponentli taşıyıcı kol mevcut X-kol ile aynı sınır şartlarında her iki analiz senaryosunda da analiz edilmiştir. Bu kapsamda yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve yapısal analizler gerçekleştirilerek

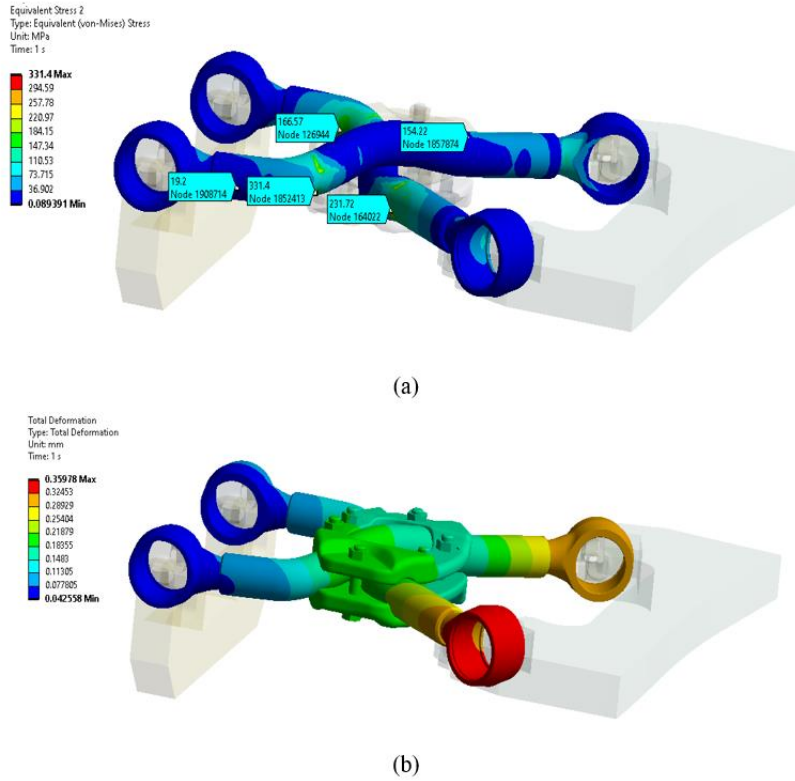
eşdeğer gerilme ve toplam deformasyon miktarları incelenmiştir. Yeni taşıyıcı kol için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde mesh yapısı 1957168 nokta ve 1337538 elemandan oluşmaktadır (Şekil 8)



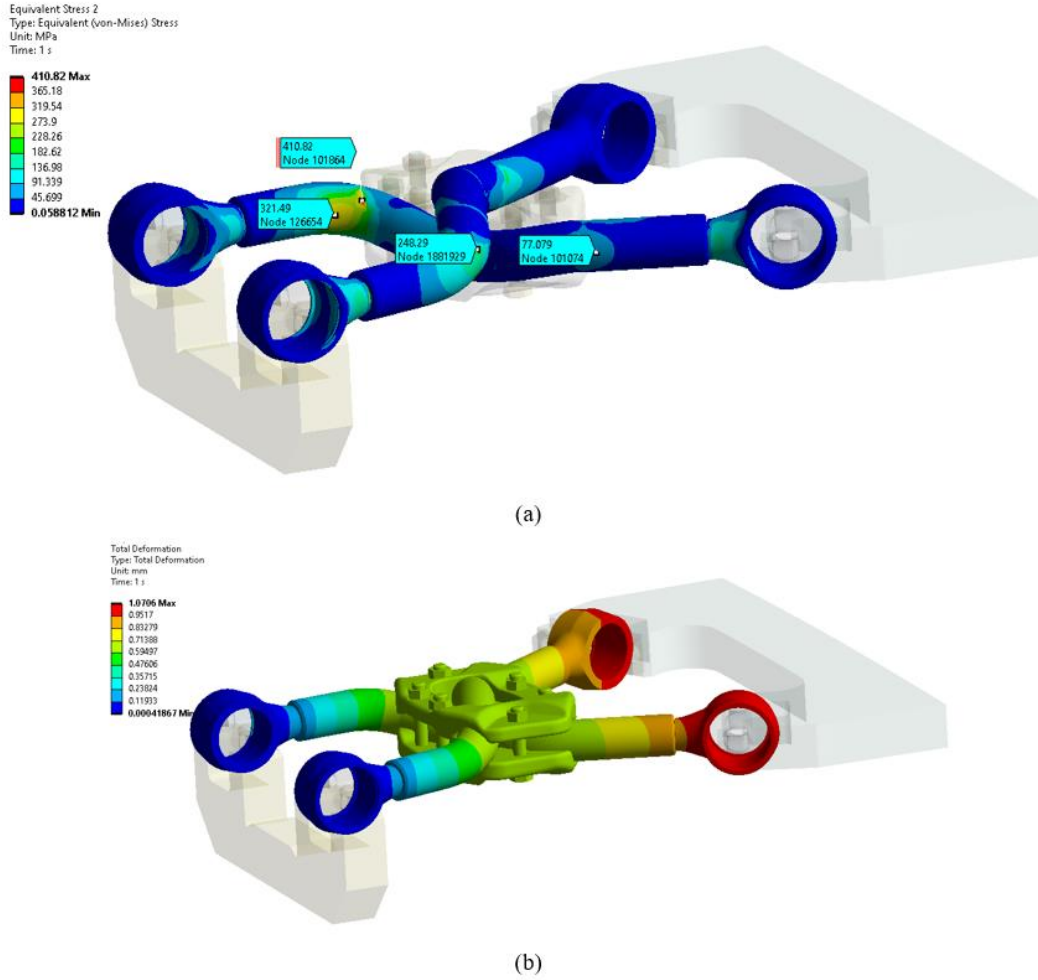
Şekil 8. Çok komponentli taşıyıcı kol yapısının sonlu elemanlar modeli (Finite element model of multi-component support arm structure)

Çok komponentli taşıyıcı kolun araç üzerinde kullanımı esnasında gelen yüklenme durumları sonlu elemanlar analizleri ile modellenmiş ve parça üzerindeki gerilmeler ile toplam deformasyonlar incelenmiştir. Bu kapsamda yeni tasarıma sahip taşıyıcı kolun birinci analiz senaryosuna ait gerilme değerleri ve toplam deformasyon miktarları Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9a'da görüleceği üzere

taşıyıcı kol üzerindeki maksimum gerilme değeri 331 MPa olarak boruları bir arada tutan alt plaka ile borunun temas ettiği bölgede gözlenmiştir. Toplam deformasyon miktarının en yüksek olduğu bölge ise kuvvetin uygulandığı parçaya bağlı olan kulakcıklar olduğu ve yaklaşık olarak 0.35 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9b).



Şekil 9. Çok komponentli taşıyıcı kol yapısının birinci senaryo analiz sonuçları a) eşdeğer gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon miktarı (First scenario analysis results of multi-component support arm structure a) equivalent stress distribution, b) total deformation amount)



Şekil 10. Çok komponentli taşıyıcı kol yapısının ikinci senaryo analiz sonuçları a) eşdeğer gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon miktarı (Second scenario analysis results of multi-component support arm structure a) equivalent stress distribution, b) total amount of deformation)

Yeni tasarıma sahip taşıyıcı kolun üzerine gelen yanal yükleme durumunun analiz edildiği ikinci senaryoya ait sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. 75 kN'luk yanal yük altında parça üzerinde en yüksek eşdeğer gerilme 410 MPa olarak boru ile levhaların arasındaki kesişme bölgesinde gözlemlenmiştir (Şekil 10a). Parçanın geneli incelendiğinde oluşan gerilmelerin parçada kullanılacak olan P460 çelik malzemenin akma dayanımının altında kaldığı görülmüştür (Tablo 1). Toplam deformasyon değeri ise bu yükleme koşulu için 1 mm olarak kuvvetin etki ettiği bağlantı kulaklarında gözlenmiştir (Şekil 10b).

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda çok komponentli taşıyıcı kolun araç üzerinde kullanımı esnasında gelen yükleme durumları sonlu elemanlar analizleri ile modellenmiş ve parça üzerindeki gerilmeler ile toplam deformasyonlar incelenmiştir. Analizlerde elde edilen gerilme değerleri boru malzemesi olarak belirlenmiş olan P460 çelik malzemenin akma dayanımından daha düşük çıkmıştır. Yapılan analizlerde en yüksek gerilme

yanal yükleme koşulunda 410 MPa olarak tespit edilmiş, bu değerde malzemenin akma dayanımından yaklaşık %10 daha düşük çıkmıştır.

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan süspansiyon sistemlerinde aks (diferansiyel) ve şasiyi birbirine bağlayan klasik X-kol yapısının çalışma koşullarındaki yükleme durumu iki farklı analiz senaryosunda sonlu elemanlar modeli oluşturularak analiz edilmiştir. Mevcut tasarımda yaşanan problemler göz önüne alınarak alternatif ayrılcı boru yapıları bir taşıyıcı kol sistemi geliştirilmiş ve bu yapı aynı sınır şartları ile sonlu elemanlar analiz yapılarak doğrulanmıştır.

Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde yeni tasarım çok komponentli taşıyıcı kol yapısı mevcut X kola göre dayanım konusunda daha düşük değerler verse de kullanılacak malzeme türünün mekanik özellikleri göz önüne alındığında emniyetli alanda kaldığı görülmüştür. Geliştirilen çok

komponentli taşıyıcı kolun tasarımında üretim prosesi de göz önüne alınarak boru ve birleştirme komponentlerinden faydalanılmıştır. Bu sayede olası bir hasar durumunda komple taşıyıcı kolun değiştirilmesi yerine hasarlı parçanın çok daha kısa zamanda ve düşük maliyetle değiştirilmesi amaçlanmıştır. Bükümlü forma sahip boru malzemesinden ve özel formlu flanş parçalarının özel şekilde birleştirilmesi ile ortaya çıkan yapının mevcut üretim yöntemlerine göre daha kolay ve daha az maliyetli olması hedeflenmiştir.

Çok komponentli taşıyıcı kolun araç üzerindeki yüklenme durumları simule edilerek iki farklı analiz senaryosunda gerilme dağılımları ve toplam deformasyon miktarları incelenmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda gerilmelerin parçadaki belirli bir bölgede yoğunlaştığı ve parçanın genel itibari ile emniyetli alanda kaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, tekrarlı yüklere maruz kalan bu tür yapılarda yorulma davranışlarının da incelenmesi ve emniyet açısından kontrol edilmesinin önemli olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı NSK Otomotiv Sanayi Tic. A.Ş. bünyesinde faaliyet gösteren Tasarım Merkezi personellerine teşekkürlerini sunar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Kayhan ALTINEL: Tasarımları oluşturmuş, sonlu elemanlar modeline destek vermiştir.

He created the designs and supported the finite element model.

Ahmet YILDIZ: Sonlu elemanlar analizleri ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He performed the finite element analysis and writing of the article.

Celalettin YUCE: Sonlu elemanlar analizleri ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He performed the finite element analysis and writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Thoresson M.J., Uys P.E., Els P.S., Snyman J.A. (2009) Efficient optimisation of a vehicle suspension system, using a gradient-based approximation method, Part 2: Optimisation results, *Mathematical and Computer Modelling* 50 (2009) 1437-1447
- [2] Xiaowan L., David T., Giacomo S., Martin R., Pascal B., Gang X., José M., Javier C., Lopez A., Miguel A. G., José A. C. (2021) Measurements and modelling of dynamic stiffness of a railway vehicle primary suspension element and its use in a structure-borne noise transmission model, *Applied Acoustics*, 182(11), 108232, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108232>
- [3] Bingul O., Yıldız A. (2023) Fuzzy logic and proportional integral derivative based multi-objective optimization of active suspension system of a 4×4 in-wheel motor driven electrical vehicle, *Journal of Vibration and Control*, 2023, Vol. 29(5-6) 1366–1386
- [4] Ge Z., Wang W., Li G., Rao D. (2022) Design, Parameter Optimisation, and Performance Analysis of Active Tuned Inerter Damper (TID) Suspension for Vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, 525 (5), 116750, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116750>.
- [5] Avikal, S. Bisht A., Sharma D. Hindwan H. Yadav K.C. S., Kumar P. Thakur P. (2020). 'Design and fatigue analysis of front axle beam of a heavy-duty truck using ANSYS' *Materials Today: Proceedings* 26, 3211–3215, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.901>.
- [6] Chandra M.R., Sreenivasulu S. Hussain, S.A. (2012). 'Modeling and Structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections', *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2 (4), July-Aug. 2012 pp-2594-2600.
- [7] Ashok G., (2019). 'Design and FEM Analysis of Heavy Vehicle Chassis Frame using Ansys', *Journal of Critical Reviews*, 6(6), 2641-2649.
- [8] Agarwal A. Mthembu L. (2021). 'Numerical Modelling and Multi Objective Optimization Analysis of Heavy Vehicle Chassis', *Processes*,

- 9(11), 2028;
<https://doi.org/10.3390/pr9112028>.
- [9] Lv T., Zhang Y., Duan Y., Yang J. (2021) Kinematics & compliance analysis of double wishbone air suspension with frictions and joint clearances, *Mechanism and Machine Theory*, 156(2), 104127, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104127>.
- [10] Llopis-Albert C., Rubio F., Zeng S. (2023) Multiobjective optimization framework for designing a vehicle suspension system. A comparison of optimization algorithms. *Advances in Engineering Software* 176 (2023) 103375
- [11] Topaç M.M., Günal H., Kuralay N.S. (2009) Fatigue failure prediction of a rear axle housing prototype by using finite element analysis. *Engineering Failure Analysis* 16 (2009) 1474–1482
- [12] Ozmen B., Topaç M.M. (2022) Effect of damping rate on fatigue failure tendency of a topology-optimised swing arm for a heavy commercial truck cab suspension. *Engineering Failure Analysis* 137 (2022) 106276
- [13] Gupta H., Rajvardhan S., Singh N.K. (2021) Design and analysis of steering knuckle of hybrid metal matrix composite for the fsae vehicle. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) 10551–10557
- [14] Shaikh S., Hujare D., Yadav S., Swarnkar P. (2023) Modelling and analysis of heavy commercial vehicle suspension system for fatigue life enhancement, *Materials Today: Proceedings*, Accepted, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.167>.
- [15] Pachapuri M.S.A., Lingannavar R.G., Kelageri N.K., Phadate K.K. (2021) Design and analysis of lower control arm of suspension system, *Materials Today: Proceedings* 47 (2021) 2949–2956.
- [16] Karadeniz E., Çolak M., Barutçu F. (2017). GGG-60 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Aşılmalı Türü ve Miktarının İyçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 275- 282.
- [17] Tufanoğlu E. (2017). P460-St52 Malzeme Çiftinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.



Earth Air Thermoelectric Generators

Günay ÖMER^{1*} 

¹Ankara Medipol University, Vocational School of Health Services, Radiotherapy Program, Ankara, TURKEY

Article Info

Research article
Received: 30/07/2023
Revision: 17/08/2023
Accepted: 22/08/2023

Keywords

Thermoelectricity
Generator
Earth-Air

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/07/2023
Düzeltilme: 17/08/2023
Kabul: 22/08/2023

Anahtar Kelimeler

Termoelektrik
Jeneratör
Toprak-Hava

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Earth-Air Thermoelectric Generator ((EATEG)) has been studied theoretically and experimentally. In addition to the TEG theory, a mathematical model for (EATEG) has been skipped using a theory that considers both the thermal processes in the soil and the thermoelectric generator working in accordance with these processes as a whole. / Toprak- Hava Termoelektrik Jeneratör (THTEJ) teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. TEJ teorisine ek olarak hem topraktaki ısıl proseslerin hem de bu proseslere uygun çalışan termoelektrik jeneratörü bir bütün olarak ele alan bir teori kullanarak THTEJ için matematiksel model geliştirilmiştir.

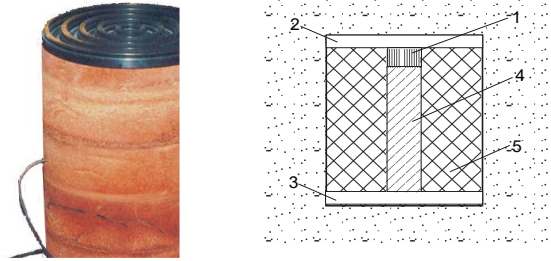


Figure 1: Earth-Air Thermoelectric Generator (EATEG) / Şekil 1: Termoelektrik Toprak-Hava Jeneratörü (THTEJ)

Highlights (Önemli noktalar)

- Yeşil teknoloji / Green technology
- Yenilenebilir enerji / Renewable energy
- Termoelektrik yarı iletken teknoloji / Semiconductive thermoelectric technology

Aim (Amaç): Earth-Air Thermoelectric Generator (EATEG) has been studied theoretically and experimentally. / Toprak -hava termoelektrik jeneratörün (THTEJ) teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

Originality (Özgünlük): For the first time, an Earth-Air Thermoelectric Generator EATEG was investigated as a whole, both theoretically and experimentally. / İlk kez bir Toprak-Hava Termoelektrik Jeneratörü THTEJ bir bütün olarak ele alınarak teorik ve deneysel olarak araştırıldı.

Results (Bulgular): Obtained experimental and theoretical results were compared. Theoretical and experimental results were equal with an error margin not exceeding 5%. / Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar %5 geçmeyecek hata payıyla eşit çıkmıştır.

Conclusion (Sonuç): This study analyses and examines the Earth-Air Thermoelectric Generator (EATEG) both theoretically and experimentally, which works with earth temperature and is recommended to be used peculiarly in safety systems. To examine how EATEG functions in natural conditions, temperatures at soil surface and inside the soil depth of which is equal to the length of the generator are measured, and ΔT temperature differences are modelled throughout the four seasons in five different districts in Ankara. Thus, it is concluded that without any requirements for an electricity cable, it is possible to create a system that can work via EATEG by generating electricity with the help of the earth's temperature in the event of a property violation or other security-related issues to notify the security units. / Bu çalışmada toprak ısı ile çalışan ve özellikle emniyet sistemlerinde kullanılması önerilen Toprak-Hava Termoelektrik Jeneratör (THTEJ) teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. THTEJ'n gerçek doğa koşullarında çalışmasını araştırmak için Ankara'nın beş farklı bölgesinde dört mevsimde jeneratörün boyuna eşit olan toprak derinliğinde ve toprak yüzeyindeki sıcaklıklar ölçülmüş, ΔT sıcaklık farkları hesaplanmış ve modelleme yapılmıştır. Böylece herhangi bir elektrik kablosuna ihtiyaç duymadan topraktaki ısı yardımıyla kendi elektriğini üreterek alan ihlali durumlarda güvenlik birimlerine haber verme özelliğine sahip bir sistemin THTEJ ile çalışabileceği tespit edilmiştir.



Earth Air Thermoelectric Generators

Günay ÖMER^{1*}

¹Ankara Medipol University, Vocational School of Health Services, Radiotherapy Program, Ankara, TURKEY

Article Info

Research article
Received: 30/07/2023
Revision: 17/08/2023
Accepted: 22/08/2023

Keywords

Thermoelectricity
Generator
Earth-Air

Abstract

This study analyses and examines the Earth-Air Thermoelectric Generator (EATEG) both theoretically and experimentally, which works with earth temperature and is recommended to be used peculiarly in safety systems. To examine how EATEG functions in natural conditions, temperatures at soil surface and inside the soil depth of which is equal to the length of the generator are measured, and ΔT temperature differences are modelled throughout the four seasons in five different districts in Ankara. To create the environment to measure and analyse how EATEG functions in natural conditions and design a thermoelectric earth-air generator and calculate its parameters, a mathematical model of EATEG is created based on both thermic processes and the standard thermoelectric generator (TEG) theory. The thermoelectric parameters such as power $P(W)$ produced by the generator based on T , voltage $U(V)$, and current $I(A)$ are calculated using a custom experiment mechanism built specifically for this study, and the results are compared to theoretical results. The outcomes of theoretical and experimental results are in congruence. It is observed that the proposed earth-air generator can provide a reliable safety system. Thus, it is concluded that without any requirements for an electricity cable, it is possible to create a system that can work via EATEG by generating electricity with the help of the earth's temperature in the event of a property violation or other security-related issues to notify the security units.

Toprak Hava Termoelektrik Jeneratörü

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/07/2023
Düzeltilme: 17/08/2023
Kabul: 22/08/2023

Anahtar Kelimeler

Termoelektrik
Jeneratör
Toprak-Hava

Öz

Bu çalışmada toprak ısı ile çalışan ve özellikle emniyet sistemlerinde kullanılması önerilen toprak-hava termoelektrik jeneratör (THTEJ) teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. THTEJ'nin gerçek doğa koşullarında çalışmasını araştırmak için Ankara'nın beş farklı bölgesinde dört mevsimde jeneratörün boyuna eşit olan toprak derinliğinde ve toprak yüzeyindeki sıcaklıklar ölçülmüş, ΔT sıcaklık farkları hesaplanmış ve modelleme yapılmıştır. Bunun için klasik termoelektrik jeneratör (TEJ) teorisine ek olarak bir termoelektrik toprak-hava jeneratörü tasarlamak veya parametrelerini hesaplamak için hem topraktaki ısı proseslerinin hem de bu proseslere uygun çalışan termoelektrik jeneratörü bir bütün olarak ele alan bir teori kullanarak THTEJ'nin bir matematiksel modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için kurulan özel test düzeneğiyle jeneratörün ΔT 'ye göre ürettiği güç $P(W)$, gerilim $U(V)$ ve akım $I(A)$ gibi termoelektrik parametreleri ölçülmüş ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Örnek uygulama olarak özel yapılmış geçek bir emniyet sisteminin çalışmasını toprak-hava jeneratörle sağladığı tespit edilmiştir. Böylece herhangi bir elektrik kablosuna ihtiyaç duymadan topraktaki ısı yardımıyla kendi elektriğini üreterek alan ihlali durumlarında güvenlik birimlerine haber verme özelliğine sahip bir sistemin THTEJ ile çalışabileceği tespit edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Due to the increasing need for alternative energy source, making good use of these sources is vital in terms of energy efficiency. The vitality of research

that aims to produce alternative energy sources in Turkey as well as around the world is unquestionable. Developed countries and countries with sufficient energy supplies focus on this subject. For instance, during 1975–1990, the USA spent

over 38 billion dollars on alternative energy production. Among many different alternative ways of producing electricity, the "minimum energy sector" which produces electricity directly from heat, occupies an important place. The characteristic features of this method are the absence of moving parts in the thermoelectric modules, durability, high reliability, ease of construction, and compatibility with all kinds of alternative and renewable heat resources. When it comes to thermoelectric generators, the source of heat might be solar heat, all sorts of waste heat, or other heat sources. In recent years, the use of the temperature difference between earth-air systems has been discussed. Due to the research about this system, both the heat processes in the earth and the design, production, and studies related to the physical features of the generators that are suitable to these processes came forward. Hence, the production and research of devices with thermoelectricity generators and systems specially addressing earth-air systems have been started [1]. In this study, one piece of an earth-air thermoelectric generator, which is supplied by TES Ltd., is examined. TEG, the basic structure of

which is shown in Figure 1, is buried in the earth and can function in two regimes depending on the weather circumstances. During hot weather or daytime, the heat that comes from the warm layer of the earth is collected in the collector number 2 and transmitted to the thermoelectric module's hot surface, which is located just below the collector. 10% of the heat passing through the module is directly converted into electricity, at most. The remaining heat is transported through heat exchanger 4 with high thermal conductivity or low thermal resistance to collector number 3, where the module is in contact with a cold surface, and then it gets spread to the colder part of the earth under the generator. During cold weather or at night, the heat that comes from the warmer layer of the buried generator is transmitted to the number 3 collector first, then to the module, and to the number 2 collector via the number 4 heat exchanger and dissipates into the air. All the parts that construct TEG are placed in an external cover that is isolated with a number 5 insulator and made of anti-corrosive, anti-biologic, and water-resistant material. Also, the cover that is used to create the generator is undetectable by detectors [2,3].

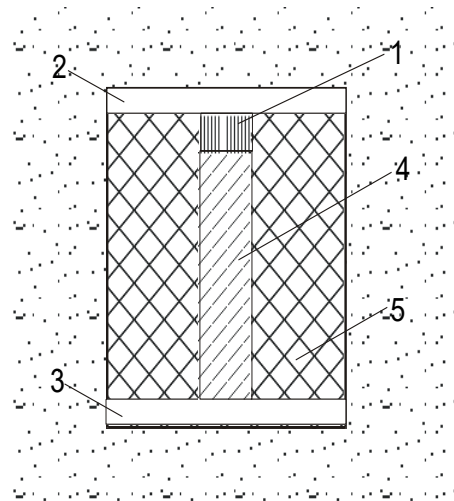


Figure 1. Earth-Air Thermoelectric Generator (EATEG) (Termoelektrik Toprak-Hava Jeneratörü (THTEJ))

2. THEORY (TEORİ)

The operation of a thermoelectric module is explained in Figure 2. A TEG system consists of three main parts: a heating block, a cooling block, and a thermoelectric module [4].

The Seebeck effect causes a decrease in DC voltage in TEG tips when there is a temperature difference between the module's surfaces. P power or I current obtained from TEG depends on the ΔT temperature difference, the features of semiconductive materials, and external R_L charging resistance values.

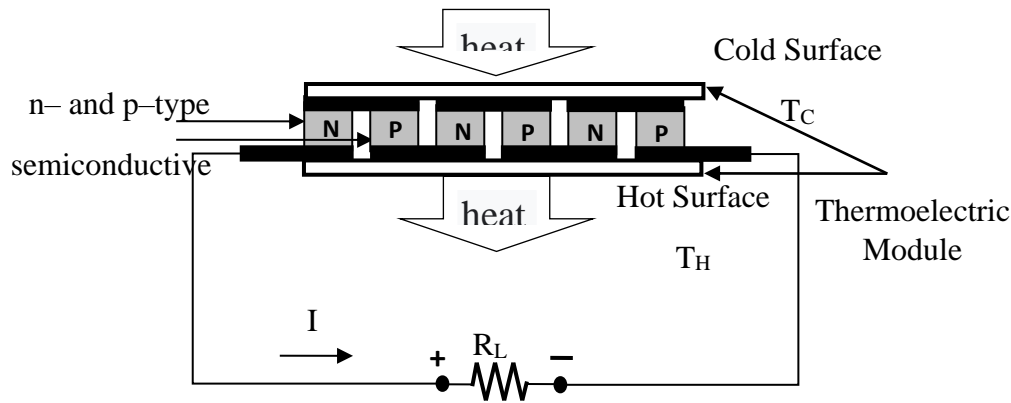


Figure 2. The use of a thermoelectric module as a thermoelectric generator (EATEG) (Termoelektrik modülün termoelektrik jeneratör olarak kullanılması)

The efficiency of a TEG is defined as the ratio of the received power (P_A) to the supplied power (P_V) as follows:

$$\eta = P_A / P_V \quad (1)$$

The semiconductor quality factor (Z) used in a TEG while the power factor ZT of a TEG is as follows:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{KR_{in}} T \quad (2)$$

In this formula; T is temperature (Kelvin), α ($\alpha = \alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n|$) Seebeck constant (V/K), K is thermal conductivity (W/mK). In a TEG, ZT is a function of the temperature difference between the surfaces of the module and ΔT . TEG efficiency is also expressed in terms of Carnot efficiency. The Carnot efficiency for TEGs is expressed as:

$$\eta_{max} = \frac{(T_H - T_C)}{T_H} \times \frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (3)$$

In this formula; The hot side temperature of TEG is T_H , the cold side temperature of TEG is T_C and their average is the average temperature of TEG, $T_{ave} = (T_H + T_C) / 2$. The highest value of the voltage produced by the TEG is when its terminals are open. The open circuit voltage V_{OC} is expressed as down below:

$$V_{OC} = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) \quad (4)$$

TEG open-circuit voltage is directly proportional to the number of thermoelements N , the temperature difference ΔT between the hot side surface temperature of the TEG, T_H and the cold side surface temperature, T_C and The Seebeck constant α_p of the p-type semiconductor material used is proportional to the Seebeck constant α_n of the n-type semiconductor material [4,5].

The power P_L produced on the charge R_L connected to a single module is expressed as:

$$P_L = I_L V_L = I_L [\alpha \Delta T - I_L R_{in}] = \alpha^2 \Delta T^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2} \quad (5)$$

In the formula, P_L is the output power of the TEG over the load, I_L is the electric current that TEG passes over the charge, and V_L is the voltage created by the TEG on the connected load. When the load resistance R_L is equal to the internal resistance R_{in} of the TEG, then TEG produces the maximum output power, P_{Lmax} , which is expressed as follows:

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{in}} \quad (6)$$

The maximum voltage V_{OC} and maximum current I_{SC} are acquired from the TEG when its terminals are open-circuited and short-circuited. Depending on the value of the connected charge, different amounts of power (P_L) are obtained from the TEG.

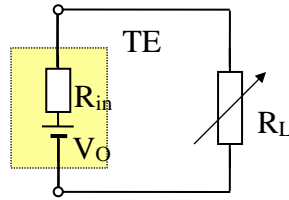


Figure 3. TEG equivalent electric circuit (TEJ eşdeğer elektrik devresi)

A V_{OC} voltage source with a TEG internal resistance R_{in} , which can be obtained from the V_{OC} short-circuits current I_{SC} section (V_{OC}/I_{SC}), can be used to represent a TEG open-circuit equivalent. The open circuit voltage (V_{OC}) is shown here is equal to the product of the temperature difference (T) and Seebeck's constant (α). At a specific temperature difference ΔT , if the TEG short-circuit current is I_{SC} then TEG's short-circuit ends. Figure 3 depicts an analogous electrical circuit connected to a thermoelectric module used as a TEG. The quantity of power obtained from the TEG varies according to the R_L value of the load resistor [5,6]

3. MATHEMATICAL MODEL
(MATEMATİKSEL MODEL)

Many theoretical and experimental studies have been carried out according to the classical theory given above [5-10]. However, they are not enough for a EATEG. To design a thermoelectric earth-air generator (EATEG) or calculate its parameters based on the given information, in addition to the formulas (1) – (6) above, both the thermal processes in the soil and the thermoelectric generator working by these processes should be considered as a whole [1]. As a result of theoretical and experimental research, it is observed that various EATEG parameters are implicitly related to each other. In general, one of the most important EATEG parameters, the produced electric power, P , is expressed as in the formula (7) [1]. $P = f[T(x,y,z,t), \lambda(x,y,z,t), c(x,y,z,t), \sum_1 Bi, Z, L(x,y,z,t)]$ (7)

In this formula, $T(x,y,z,t)$ is the spreading of the temperature in the earth buried inside, $\lambda(x,y,z,t)$ and $c(x,y,z,t)$ are the thermal conductivity of the earth and the volumetric thermal capacity parameter, the thermal balance of the algebraic total in the earth, and Z is the efficient parameter of the earth thermoelectric generator.

$L(x,y,z,t)$ is a space coordinate that demonstrates the location inside EATEG's geometric dimensions, and t is for time.

$$P = f[T(z,t), \lambda(z,t), c(z,t), \sum_1 Bi, Z, L(z)] \quad (8)$$

By presuming that the temperature of the earth is a one-dimensional function and the earth's thermal parameters are stable, the output power can be calculated by including the main features that affect how a EATEG functions. To achieve this goal, it is possible to benefit from the chart shown in Figure 4. In this diagram, a EATEG of dimensions D and H is buried at a depth of h . It would be more acceptable in this situation to solve the issue using a cylindrical coordinate system and account for the system's symmetry to determine the electrical power P generated by the earth's thermoelectric generator. The positive Z -axis direction in this instance is defined from the earth's surface, and the r and z cylindrical coordinates are as in Figure 4.

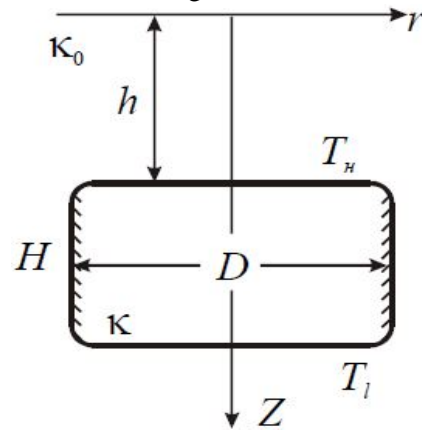


Figure 4. Chart of buried EATEG [1]
(Toprağa gömülü THTEJ'in şeması)

The solution of the heat conduction differential equation defined below with the temperature distribution function $T(r,z,t)$ in the earth is:

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$-\kappa_0 \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = q_0 \cos \omega t, z = 0 \quad (10)$$

$$T(h, r < D/2, t) = T_i(t) \quad (11)$$

$$T(H + h, r < D/2, t) = T_i(t) \quad (12)$$

$$-\kappa_0 \int_S \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} \Big|_{z=h} dS = \frac{1}{R_{EATEG}} (T_H(t) - T_i(t)) \quad (13)$$

$$-\kappa_0 \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = 0, h < z < h + H \quad (14)$$

In this equation, χ stands for the soil's heat transmission coefficient and κ_0 stands for the temperature transmission coefficient. $T_H(t)$ and $T_i(t)$ are the temperatures at the upper and lower surfaces of the EATEG that must be determined, and R_{EATEG} is the thermal resistance of the EATEG. q_0 and ω are the amplitude and periodic frequency of the harmonic oscillation of the heat flux density on the surface of the soil. The following equations are the edge conditions of their physical interpretations are as follows: (11) and (12) express that the lower and upper surfaces of the EATEG are isothermic, meaning that their temperatures are constant on all of their surfaces, (13) expresses the thermal stability of the EATEG's heat-receiving surface, and (14) is the requirement for the sides of the EATEG to be adiabatic insulation. Condition (10) provides the heat flux on the soil's surface.

The Rankin's method solution of equation (9)–(14) yields the following formula for the T amplitude of the oscillation of the temperature difference between the two sides of the EATEG for the kvasistosanar, periodic with regard to time and $H < h$ state:

$$\Delta T = \frac{q_0}{\kappa_0} \exp(-\gamma h) F \left(k, \frac{H}{D} \right) \quad (15)$$

In this equation, $\gamma = \sqrt{\omega/2\chi}$, $\kappa = 4H / R_{EATEG} D^2 \kappa_0 \pi - EATEG$ - It is the ratio of the earth

piece's heat resistance equal to the volume of EATEG to the generator's heat resistance. It is a complicated function that depends on its variations is $F(\kappa, \frac{H}{D})$. However, with a less than 5% error margin, this function can be stated as follows when these arguments are in the range of 0.1 to 5%:

$$F(\kappa, \frac{H}{D}) = 1 + (1 - \kappa) / (\kappa + 2H / \pi R_{EATEG}) \quad (16)$$

The heat flux function, which is comparable to the Lukosh function used in the theory of eddy thermoelectric currents and it can be used to determine the distribution of the heat flux density in a patch of soil with a EATEG since the issue under examination has a cylindrical (axis) symmetry [1]. The difference between the positions (z, r_1) and (z, r_2) of this function, $r_1 < r < r_2$, represents the entire heat flux through the ring in this case. The heat flux function can be expressed using the following equation:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} = 0 \quad (17)$$

$$\psi(r, 0) = -\frac{1}{4\pi} q_0 r^2 \cos \omega t \quad (18)$$

$$\psi(r, h + H) = \psi(r, h) = -\frac{1}{4\pi} q r^2 \quad \psi(r, h + H) = \psi(r, h) = -\frac{1}{4\pi} q_{EATEG} r^2 \quad (19)$$

In this formula: $q_{EATEG} = \Delta T / \pi R_{EATEG} D$. According to this model, the amplitude of the heat flux oscillation on the heat incoming surface of the EATEG for the small ΔT valid in the EATEG

$$q = q_0 \exp(-\gamma h) k F(\kappa, \frac{H}{D}) \quad (20)$$

and the efficiency of EATEG is:

$$\eta = Z \Delta T / 4 \quad (21)$$

Hence, the power produced by a EATEG from formulas (15), (20), and (21)

$$P = V q_0^2 \exp(-2\gamma h) Z k F^2(\kappa, \frac{H}{D}) / \sqrt{2} \quad (22)$$

Based on this formula, the power produced by the EATEG increases in direct proportion to the V -volume of the EATEG, Z , and q_0^2 , while it decreases exponentially according to the depth where the EATEG is buried, and changes non-monotonically according to the k and H/D parameters.

4. EXPERIMENT (DENEY)

During the experimental studies, parameters such as power P(W), voltage U(V), and current I(A) produced by the generator were examined, specifically according to T. Throughout four seasons, temperature differences at the soil depth of 25 cm and 50 cm and at the soil surface were equal to the length of the generator, and the temperature differences were measured and modeled in five different precincts in Ankara

according to these data and values. Earth generator lab tests are performed based on the obtained wide range of temperature differences. An experimentation mechanism is designed and built specifically for this purpose. Temperature differences were measured at the soil depth of 25 cm and 50 cm and the soil surface in five different precincts in Ankara.



Figure 5. Figure of the thermometer measured the temperature of the earth (Toprak derinliğinden ölçüm alınan termometrenin örnek görüntüsü)

Two examples from extensive field tests are given below. The maximum temperature differences according to the location of the data

taken in the four seasons were recorded. An example of these data is shown in both Figure 6 and Figure 7

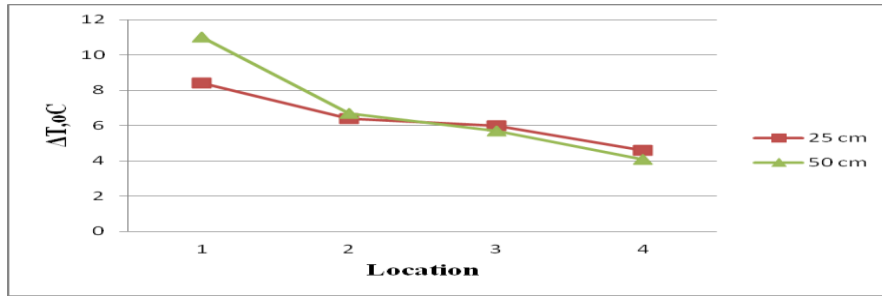


Figure 6. Based on the location of the data obtained in winter, max temperature differences (Kış mevsiminde alınan verilerin konuma göre maksimum sıcaklık farkları)

In this figure, location number 1 is Bağlum, location number 2 is Keciören, location number 3 is Kızılcahamam, location number 4 is Beşevler, and location number 5 is Yenimahalle.

The highest T is given depending on the location, either 25 cm or 50 cm soil depth. The highest temperature difference, measured in the Yenimahalle location, is 11 °C.

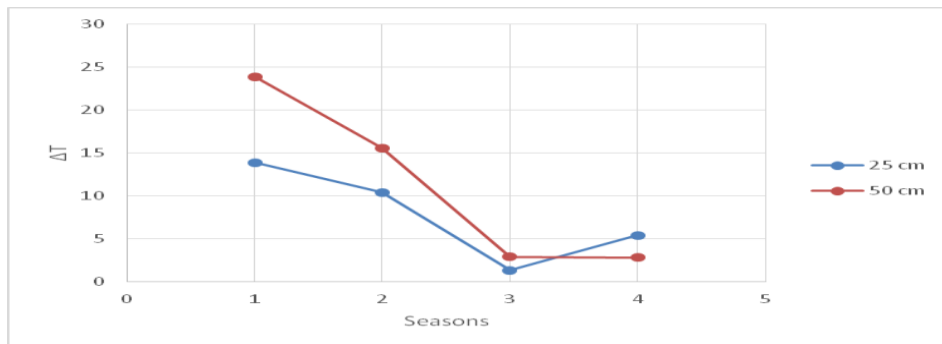


Figure 7. Maximum temperature differences according to seasons in Bağlum Location (Bağlum konumunda alınan mevsimlere göre maksimum sıcaklık farkları)

The highest ΔT graph is created for 25 cm and 50 cm soil depths in the Bağlum location, according

to seasons. Number 1 represents spring, number 2 represents summer, number 3 represents fall,

and number 4 represents winter. In spring, the largest temperature difference was observed. After completing one year of field research, the

obtained maximum and minimum temperature differences are given below.

Table 1. The maximum temperature differences in the four seasons (Dört mevsimdeki maksimum sıcaklık farkları)

Data	ΔT_{\max} °C	ΔT_{\max} °C
	25cm	50cm
Spring	-13,9	-23,9
Summer	10,4	15,6
Fall	2,2	-6,4
Winter	-8,1	-10,9

The parameters of EATEG for ΔT , also including the real temperature differences measured in the field were simulated in

laboratory studies. The custom experimental setup that was created for this goal is given below [2,3,7].

RF (Radio Frequency) Transmitter Motion Sensor Multimeter Aluminium Perforated Cylinder



Figure 8. TEG Test Mechanism (TEJ Test Düzenegi)

In this experimental setup, custom-made linear heating devices were used to create a temperature difference between the surfaces of the generator. A plate-shaped heater with A=8 cm B=5 cm, AxB, operating with 220 V AC, was used in the experiment. The total resistance of the heater, including the cable, was measured at 0.564 k Ω with a T-YAN MY-64 type multimeter. According to this data, the thermal power produced by the heater is $P = U^2 / R$, and the heater's power value is $P = (220)^2 / 564 = 85.815$ watts.

The earth-air generator designed by TES Ltd. was tested and approved in terms of what temperature difference and what value of power is enough to launch (to create the example application for) a safety system. When the EATEG is measured, it is at 21.4 volts when it is unloaded and at 5 volts when it is loaded. It is observed that the safety system is working during the measurement phase when EATEG is neutral at 21.3 volts and when it is charged at 5 volts.

5. RESULTS AND DISCUSSIONS

(BULGULAR VE TARTIŞMALAR)

For ΔT that includes the temperature differences calculated during field studies, EATEG parameters are calculated experimentally and compared to theoretical results. During theoretical calculation, for a real EATEG's

$H=25\text{cm}$, $D = 9,6\text{cm}$, $\Delta T = 8^\circ\text{C}$, the output voltage $1,5\text{ V}$, power $1,2\text{mW}$ and for the thermoelectric module, $Z = 2,6 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ values are used. Both theoretical and experimental results are identical, with an error margin of not more than %5. These findings are shown in Figure 9.

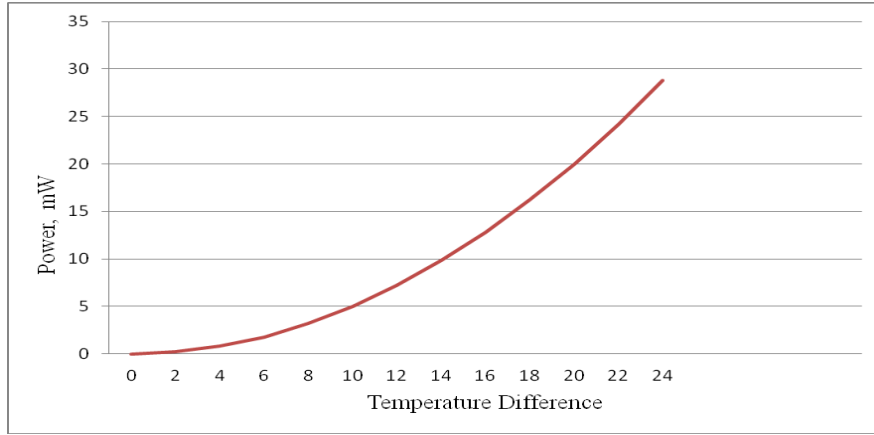


Figure 9. Power Chart of EATEG (THTEJ'ün Güç Eğrisi)

Voltage-power-current features of EATEG are gathered and compared to theoretical results.

The findings are shown in Figure 10.

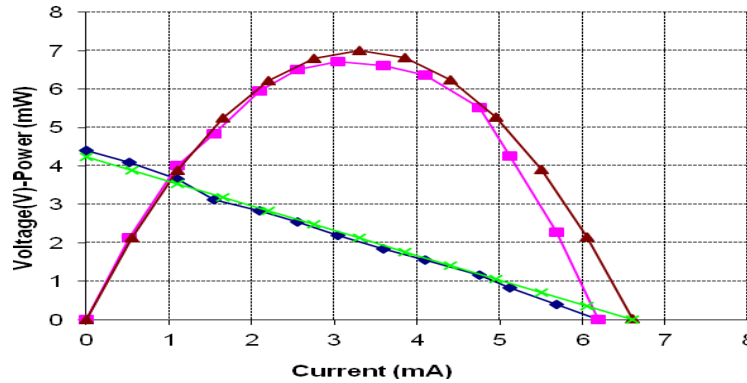


Figure 10. Thermoelectric Features of EATEG (THTEJ'ün Termoelektrik Özellikleri)

As shown in Figure 10, experimental and theoretical results are quite similar[8-10].

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study analyses and examines the Earth-Air Thermoelectricity Generator (EATEG) both theoretically and experientially, which works with earth temperature and is recommended to be used peculiarly in safety systems. To examine how EATEG functions in natural conditions, temperatures at the soil depth and soil surface that were equal to the length of the generator, and temperature differences between these locations ΔT were measured and modelled throughout four seasons in five different districts

in Ankara. $T_{\text{max}} = 23,9^\circ\text{C}$ and $T_{\text{min}} = 2,2^\circ\text{C}$ are measured according to the data. To categorize all temperature differences that include these values as well, experimental research is carried out in a EATEG laboratory The theoretical and experimental results obtained were compared to one another. In addition to the standard TEG theory, a mathematical model of EATEG is developed to either design a thermoelectric earth-air generator and to calculate its parameters by using both the thermic processes where the thermoelectric generator works well for these processes. With a custom test setup designed for experimental operation, thermoelectric parameters including power P(W), voltage U(V),

and current I(A) produced by the generator are found to be in conformity with the experimental results. Both theoretical and experimental results are identical, with an error margin of not more than 5%. As a prototype application, it was discovered that a specially constructed actual safety system operates with an earth-air generator.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study is supported by TES Ltd.

Bu çalışma TES Ltd. tarafından desteklenmektedir.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods used in her studies do not require ethics committee approval and / or legal 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)

Günay ÖMER: She 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] Anatyчук L.I., Mikityuk P.D. Thermal generators using heat flows in soils. Journal of Thermoelectricity, 3(91-10), (2003).
- [2] Bakar, Ö., and Ahıska, R. 2022. "Termoelektrik Güvenlik Sistemi." Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 4 (1)(290-299), (2022).
- [3] Bakar O., Ahıska R. The smart thermoelectricity safety system with soil-air generator. Journal of Physical Science and Application, 12(1)(6-11), (2022).

- [4] Mamur, H. Implementation of Computerized Data Acquisition and Test System for Investigation of Electrical, Thermoelectric and Thermal Parameters of Thermoelectric Generator, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-11. (2013).
- [5] R. Ahıska and H. Mamur. "Comparison of thermoelectric and fotovoltaic solar panels," XVI International Forum on Thermoelectricity. Paris, 26-29. (2015).
- [6] Omer G., Yavuz A. H., Ahıska R., Calisal K. E. Smart Thermoelectric Waste Heat Generator: Design, Simulation and Cost Analysis. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 37(1-8), (2020).
- [7] Mamur H., Ahıska R. Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. Energy Conversion and Management, 97(265-272), (2015).
- [8] Dislitas, S. Microcontroller Controlled Geothermal Thermoelectric Generator Desing and Application, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-17. (2002).
- [9] Ahıska, R., Dislitas, S. Microcontroller Based Thermoelectric Generator Application. Journal of Science of Gazi University, 19(2) (135-141), (2006).
- [10] Riffat, S.B. ve Ma, X., Thermoelectrics: a Review of Present and Potential Applications. Applied Thermal Engineering, 23(8) (913-935), (2003).

COVID-19 Detection with Deep Learning Methods Under Cross-Dataset Evaluation

Yahya DOĞAN^{1*} 

¹Siirt University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Siirt, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/11/2022
Revision: 28/04/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Deep Learning
COVID-19
Convolutional Neural
Networks
Grad-CAM
Transfer Learning

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/11/2022
Düzeltilme: 28/04/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
COVID-19
Evrimsel Sinir Ağları
Grad-CAM
Öğrenme Aktarımı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Recently, deep learning algorithms have been utilized as an effective method for the rapid detection of COVID-19. However, the limited geographical coverage of the datasets used in these studies raises the possibility that the model contains racial biases and cannot demonstrate the same performance across multiple datasets. In this study, the performance of transfer learning models was examined through cross-data evaluation. / Son zamanlarda, derin öğrenme algoritmaları, COVID-19'un hızlı tespiti için etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır. Ancak, çalışmalarda kullanılan veri setlerinin sınırlı coğrafi kapsamı, modelin etnik bağımlılığa sahip olabileceği ve farklı veri setlerinde aynı performansı gösterememe riskini artırabilir. Bu çalışmada, çapraz veri değerlendirilmesiyle öğrenme aktarma modellerinin performansı incelenmiştir.

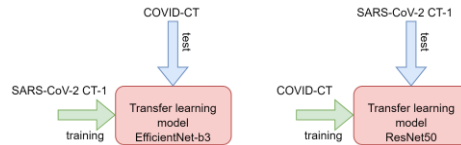


Figure A: Model comparison under cross-dataset setting / **Şekil A:** Çapraz veri seti ayarında model karşılaştırması

- The performances of state-of-the-art deep learning models were compared using popular COVID-19 datasets. / Yaygın COVID-19 veri setleri kullanılarak güncel derin öğrenme modellerinin performansları karşılaştırıldı.
- Cross-dataset evaluation was performed using the two most common datasets collected for COVID-19 detection. / COVID-19 tespiti için toplanan en yaygın iki veri seti kullanarak çapraz veri seti değerlendirilmesi yapılmıştır.
- Grad-CAM and the top-performing ResNet50 model were used to detect the focused areas in CT images. / Grad-CAM ve en iyi performans gösteren ResNet50 modeli, BT görüntülerinde odaklanılan alanları tespit etmek için kullanıldı.

Amaç (Aim): The aim of this study is to investigate whether the datasets collected within the scope of COVID-19 exhibit ethnic biases. / Bu çalışmanın amacı, COVID-19 kapsamında toplanan veri setlerinin etnik bağımlılık taşıyıp taşımadığını araştırmaktır.

Özgünlük (Originality): This study demonstrates the limited success of COVID-19 detection under cross-dataset evaluation and reveals that even with fewer training samples, utilizing a general dataset yields higher scores. / Bu çalışma, çapraz veri seti değerlendirmesi altında COVID-19 tespitindeki sınırlı başarıları ve daha az örnekle eğitim yapıldığında bile genel bir veri setinin daha yüksek skorlar sağladığını göstermektedir.

Bulgular (Results): Experimental results indicate that the successes achieved in COVID-19 datasets are not generalizable and exhibit ethnic dependency. / Deneysel sonuçlar, COVID-19 veri setlerindeki başarıların genellenebilir olmadığını ve etnik bağımlılık taşıdığını göstermektedir.

Sonuç (Conclusion): COVIT-CT, when used as the training set, produces low training performance but high test scores. This can be attributed to the broader and more diverse nature of the COVIT-CT dataset. The SARS-CoV-2 CT dataset, acquired from hospitals in the same state, demonstrates high performance on the training set but poor performance on the test set. This indicates a weak generalization ability of the model trained on this dataset. In the conducted experimental investigations, the ResNet50 model achieved the highest score (71.47%) in cross-dataset evaluation. / COVIT-CT eğitim seti olarak kullanıldığında, eğitim performansı düşük olmasına rağmen test skorları yüksektir. Bunun nedeni, COVIT-CT veri setinin daha genel ve çeşitli olmasıdır. SARS-CoV-2 CT veri seti ise aynı eyaletteki hastanelerden toplandığı için eğitim seti başarısı yüksek olmasına rağmen test başarısı düşüktür. Bu durum, bu veri setiyle eğitilen modelin genelleme yeteneğinin zayıf olduğunu göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, çapraz veri seti değerlendirmesi altında en yüksek skor (%71.47) ResNet50 modeliyle elde edilmiştir.



Derin Öğrenme Yöntemleriyle Çapraz Veri Seti Değerlendirmesi Altında COVID-19 Tespiti

Yahya DOĞAN^{1*}

¹Siirt University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Siirt, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/11/2022
Düzeltilme: 28/04/2023
Kabul: 17/05/2023

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
COVID-19
Evrimsel Sinir Ağları
Grad-CAM
Öğrenme Aktarımı

Öz

COVID-19 salgını tüm dünyayı etkilemiş ve son yüz yılın en şiddetli rahatsızlıklarından biri haline gelmiştir. Yüksek bulaşıcılığı nedeniyle, COVID-19'un erken aşamada tespiti ve enfekte olan hastaların diğerlerinden izole edilmesi pandemiyi kontrol etmede en önemli aşamalardan biridir. Revers-Transkriptaz Polimeraz Zincir Reaksiyonu (RT-PCR) enfekte olan hastaları teşhis etmek için kullanılan en yaygın yöntemdir; ancak, bu yöntem zaman alıcı ve yoğun emek gerektirmektedir. Yakın zamanda, COVID-19'un hızlı tespiti için bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak yapılan derin öğrenme tabanlı birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, enfekte olan hastalar hızlı ve yüksek doğruluk oranları (>%97) ile tespit edilebilmektedir. Fakat bu kapsamda hazırlanan veri setleri incelendiğinde, verilerin genellikle aynı ülke veya aynı ildeki hastanelerden elde edildiği gözlenmektedir. Bu durum, kurulan modelin etnik bağımlılığa sahip olmasına ve farklı veri setlerinde aynı performansı göstermemesine neden olabilir. Bu çalışmada, çapraz veri değerlendirme (eğitim ve test için farklı veri setleri) altında güncel derin öğrenme modellerinin performansı deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen modeller arasında en yüksek tespit skoru %71.47 ile ResNet50 modeli kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, eğitilen ResNet50 modelinin görüntünün sınıfına (Covid/Non-Covid) karar verirken odaklandığı alanları göstermek için Grad-CAM sonuçları sağlanmıştır.

COVID-19 Detection with Deep Learning Methods Under Cross-Dataset Evaluation

Article Info

Research article
Received: 26/11/2022
Revision: 28/04/2023
Accepted: 17/05/2023

Keywords

Deep Learning
COVID-19
Convolutional Neural Networks
Grad-CAM
Transfer Learning

Abstract

The COVID-19 epidemic has affected the whole world and has become one of the most severe diseases of the last century. Due to its high prevalence, early detection of COVID-19 and isolating infected patients from others is one of the most important points in controlling the pandemic. The reverse polymerase chain reaction (RT-PCR) is the most common method used to diagnose infected patients; however, this method is time-consuming and labor-intensive. Recently, there are many deep learning-based studies using computer tomography images for rapid detection of COVID-19. In these studies, infected patients can be detected rapidly and with high accuracy i.e. > 97%. When the datasets collected in this context are examined, it is observed that the data are generally obtained from hospitals in the same country or in the same province. This may cause the established model to have an ethnic dependency and not perform the same performance in different datasets. In this study, the performance of state-of-the-art deep learning models under cross-data evaluation, i.e., different datasets for training and testing, is experimentally investigated. The highest detection score was obtained by using the ResNet50 model with 71.47% among the models examined. Moreover, Grad-CAM results are provided to show the areas that the trained ResNet50 model focuses on when deciding on the class of the image (Covid/Non-Covid).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Koronavirüs hastalığı (COVID-19) ilk olarak Aralık 2019'da Çin'in Wuhan kentinde bildirildi ve dünya çapında hızla yayılarak her gün binlerce ölüme sebep oldu. Bu virüsün yüksek enfeksiyon oranları

nedeniyle, enfekte kişiyi izole etmek için erken teşhis önemlidir; sonradan tanıtılan virüs varyantları daha yüksek enfeksiyon oranlarına sahiptir. Günümüzde Covid-19'u tespit etmek için kabul edilen standart ve en yaygın kullanılan yöntem Ters

Transfer Polimeraz Zincir Reaksiyonudur (Reverse Transfer Polymerase Chain Reaction-RT-PCR) [1]. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha yüksek başarı oranı ile tanı sağlar; ancak RT-PCR yöntemi zaman alıcıdır ve hastalığın erken evrelerinde duyarlılığı düşüktür [2]. Son bulgular, COVID-19 ile enfekte hastaların, yapay zeka yaklaşımları kullanılarak göğüs röntgeni [3-5] veya bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleri [6-8] ile hızlı bir şekilde tespit edilebileceğini göstermektedir. Hem BT hem de X ışınları, iç vücut yapılarının görüntülerini sağlar. Bu yöntemler karşılaştırıldığında, geleneksel X-ışınlarında yapılar üst üste geldiğinden BT, X-ışınlarından daha fazla bilgi sağlar; kaburgalar göğsü örterek tanıyı kısmen zorlaştırır. Bu bağlamda birçok araştırmacı, BT görüntülerini kullanarak COVID-19 teşhisi için yapay zekâ teknikleriyle bir karar destek aracı sağlamayı hedeflemektedir. Yapay zekâ, özellikle yapay zekânın bir alt dalı olan derin öğrenmedeki hızlı ilerlemeler, organ segmentasyonu [9], görüntü iyileştirme veya onarımı [10], hastalık tespiti veya sınıflandırması [11] gibi tıbbi alanlarda ve farklı alanlardaki birçok çalışmada [12-18] önemli katkılar sağladığı gözlenmektedir.

BT göğüs görüntülerinden oluşan birkaç açık çevrimiçi veri seti mevcuttur. Bildiğimiz kadarıyla, teşhis için en yaygın kullanılanları COVID-CT [19] ve SARS-CoV-2 CT-1 tarama [20] veri setleridir. Şekil 1'de, COVID-CT veri setinden alınan bazı örnek görüntüler verilmiştir. Literatürde, COVID-19 hastalığını tespit eden çalışmaların başarısı, veri setini bölme yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Genel olarak araştırmacılar 2 farklı bölme yöntemi kullanmaktadır; rastgele (random) ve kişiden bağımsız. Rastgele yöntemde, veri seti rastgele olarak eğitim, doğrulama ve test olarak ayrılmaktadır; diğer bir deyişle, aynı kişiye ait görüntüler 3 parçanın tamamında olabilir. Bu yöntemde, test veri setindeki hastaların farklı görüntüleri daha önce modele girdi olarak verildiğinden, ilgili hastalara yönelik bir eğilim (bias) oluşmaktadır. Genel olarak, rastgele bölme işlemi yapıldığında, modellerin başarı oranları yüksek olmakta (>90), ancak genelleme yeteneği düşük kalabilmektedir; diğer bir deyişle, model eğitiminde görüntüleri olmayan hastaların teşhisi zor olabilmektedir. Kişiden bağımsız yöntemde ise veri seti hasta bazlı bölünmektedir. Bu bölme yönteminde, eğitim, validasyon ve test veri setinde farklı hastalara ait görüntüler kullanılmamaktadır. Bu yöntemde, modelin eğitim işlemi daha zor olabilmekte ve rastgele yöntemine göre performansı düşük kalabilmektedir. Fakat rastgele bölme yöntemi ile kıyaslandığında, hastalara karşı bir

eğilim oluşmadığı için modelin genelleme yeteneği daha iyi olmaktadır.

Belirtilen bu bölme yöntemlerinde aynı veri seti kullanılmaktadır. COVID-19 kapsamında hazırlanan veri setleri incelendiğinde genellikle aynı ülke veya aynı ildeki hastanelerden elde edildiği görülmektedir. Bu, elde edilen modelin etnik bağımlılığa sahip olmasına ve farklı veri setlerinde aynı performansı göstermemesine sebep olabilir. Bu çalışmada temel amaç, çapraz veri seti değerlendirmesi altında COVID-19 tespiti için güncel transfer öğrenme modellerinin performansını incelemektir.

Bu çalışmanın temel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Derin öğrenme alanında ImageNet [21] gibi büyük veri setlerinde önemli başarılar sağlayan modellerin COVID-19 veri setindeki performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır.
- COVID-19 tespiti için toplanan en yaygın iki veri seti kullanılarak çapraz veri seti değerlendirilmesi yapılmıştır.
- En yüksek performans gösteren derin öğrenme modeli kullanılarak, COVID-19 tespitinde, BT görüntülerinde hangi noktalara odaklanıldığı incelenmiştir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. Bölüm 2'de ilgili alandaki önceki çalışmalar kısa ve öz bir şekilde ele alınmıştır. Bölüm 3'te çalışma kapsamında kullanılan veri setleri ve modeller hakkında kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bölüm 4'te deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular ve değerlendirmeler sunulmuştur. Bölüm 5'te ise sonuçlar kısaca özetlenmiş ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar belirtilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

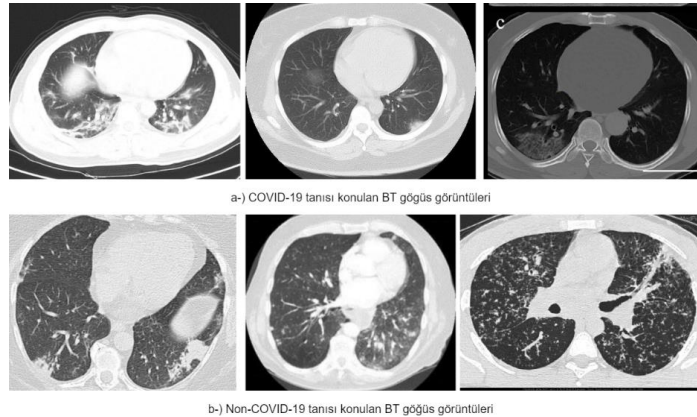
2.1. Veri Setleri (Datasets)

Bu çalışmada, COVID-19 teşhisi için hazırlanan iki yaygın veri seti kullanılmıştır. COVID-19 için önerilen yöntemler incelendiğinde genellikle aynı veri setinden görüntü setleri ile eğitilmekte ve test edilmektedir. Bu çalışmada, temel hedef derin öğrenme yöntemlerini kullanarak bireylerden ve etnik bağımlılıktan bağımsız olarak COVID-19 tespiti yapmaktır. Bu kapsamda iki aşamalı yol izlenmiştir. İlk aşamada, en yaygın veri setlerinden biri olan SARS-CoV-2 CT-scan veri seti eğitim ve farklı makalelerden toplanan görüntülerden oluşan

COVID-CT test olarak kullanılarak güncel derin öğrenme modellerinin performansı deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise eğitim ve test veri setlerinin yeri değiştirilip model performansları incelenmiştir.

COVID-CT [19]: Bu veri seti COVID-19 klinik bulgularını içeren 216 hastadan toplanan 349 BT görüntüsünden ve farklı hastalık türleri içeren 397 negatif BT görüntüsünden oluşmaktadır. İlgili veri setindeki görüntüler medRxiv, bioRxiv, NEJM, JAMA, Lancet vb. kaynaklı COVID-19 ile ilgili bilimsel makalelerden toplanmıştır. COVID-19 anormallikleri içeren BT'ler, makalelerdeki şekil başlıkları okunarak seçilmiştir.

SARS-CoV-2 CT-scan [20]: Bu veri seti SARS-CoV-2 enfeksiyonu pozitif olan 1252 BT taraması ve SARS-CoV-2 ile enfekte olmayan hastalar için 1230 BT taraması olmak üzere toplamda 2482 BT taramasından oluşmaktadır. Enfekte olanların 32'si erkek ve 28'i kadın olmak üzere 60 hasta, enfekte olmayanların 30'u erkek ve 30'u kadın olmak üzere 60 hasta verisi mevcuttur. Veri setindeki görüntülerin çözünürlükleri farklıdır ve kontrast farklılıkları vardır. Bu veri seti, tek bir eyaletteki, yani Brezilya'daki Sao Paulo hastanelerinden toplanmıştır.



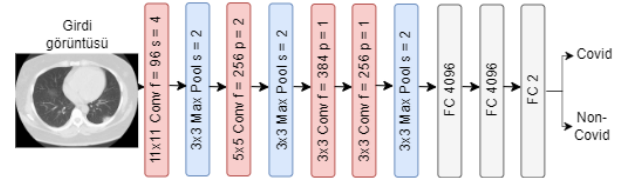
Şekil 1. SARS-CoV-2 CT tarama veri kümesinden COVID-19 (üstte) ve Non-COVID-19 (altta) için BT örnek görüntüleri (CT images of COVID-19 (top) and Non-COVID-19 (bottom) from the SARS-CoV-2 CT scan dataset)

2.2. Mimariler (Architectures)

Bu kısımda çalışmada kullanılan derin öğrenme modelleri ele alınmıştır

AlexNet [22]: Krizhevsky ve diğerleri tarafından önerilen AlexNet mimarisi, 2012 ImageNet yarışmasını top-5 kategorisinde %15,3'lik hata oranıyla kazanmıştır. Bu mimari, öğrenme yoluyla otomatik olarak elde edilen öznelikleri kullanmanın, manuel olarak elde edilen öznelikleri kullanmaktan daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Şekil 2'de COVID-19 problemine uyarlanan AlexNet mimarisi verilmiştir. Mimari, beş evrişim (convolution) katmanından ve üç tam bağlantılı (fully connected) katmandan oluşmaktadır. AlexNet mimarisinde CNN'lerde günümüzde de kullanılan bazı yaklaşımlar kullanılmıştır; ReLU aktivasyon fonksiyonu, çoklu GPU yaklaşımı ve örtüşen havuzlama (pooling) tekniği. Model yaklaşık 60 milyon öğrenebilir parametre barındırmaktadır. Kapasitesi yüksek olduğundan aşırı öğrenme (overfitting) problemi meydana gelebilmektedir. Bunun üstesinden

gelmek için veri artırma ve dropout teknikleri kullanılmıştır.

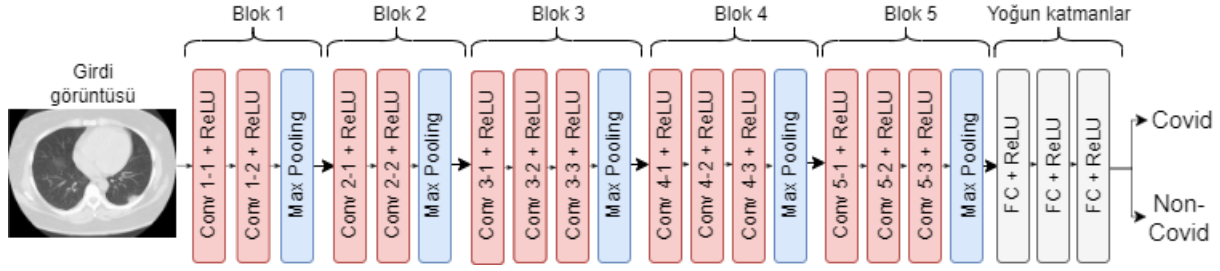


Şekil 2. AlexNet mimarisi. s stride, p padding FC ise tam bağlantılı katmanları temsil etmektedir (The AlexNet architecture. s represents stride, p represents padding, and FC represents fully connected layers)

VGG16 [23]: Simonyan ve Zisserman tarafından önerilen bu mimari 2014 yılında ImageNet veri setinde top-5 kategorisinde %92.7 test doğruluğu ile ILSVR-2014 yarışmasında en yüksek skoru almıştır. VGG16 mimarisinde AlexNet mimarisinde kullanılan yüksek çekirdek (kernel) boyutları azaltılmıştır. 3x3 filtre kullanan evrişim bloklarına ve 2x2 max havuzlama katmanlarından oluşan bir mimariye sahiptir. Tüm mimari boyunca tutarlı bir şekilde evrişim ve maksimum havuzlama

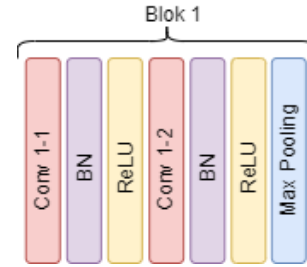
katmanları kullanılmaktadır. Sınıflandırma bloğunda ise softmax katmanı ile biten tam bağlantılı katmanlar içermektedir. VGG16'nın temel dezavantajı ise model kapasitesinin yüksek olmasıdır; yaklaşık 138 milyon parametreye

sahiptir. Bu nedenle, eğitilmesi çok yavaştır, oldukça fazla disk alanı ve bant genişliği alır ve bu da onu verimsiz kılar. Şekil 3'te VGG16 mimarisi verilmiştir.



Şekil 3. VGG16 mimarisi. FC katmanları arasında dropout katmanları kullanılmaktadır (The VGG16 architecture. Dropout layers are used between the FC layers)

VGG16_BN: CNN modellerinde ağırlık derinliği arttıkça gradyan azalması (vanishing gradient) olarak adlandırılan bir problem ortaya çıkmaktadır; gradyanlar son katmanlardan ilk katmanlara doğru aktarılırken azalmakta veya sönümlenmektedir. Bu durum, modelin ilk katmanlardaki parametrelerin güncellenmemesine ve dolayısıyla model performansının düşük kalmasına sebep olmaktadır. VGG16_BN modelinde, VGG16'daki her konvolüsyon katmanından sonra batch normalization (BN) [24] katmanı kullanılmaktadır. BN, verileri aktivasyon fonksiyonuna (yani ReLU) vermeden önce ortalama ve standart sapmayı kullanarak veriyi normalize etmektedir. Bu yöntem ile aktivasyonlar doyuma ulaşmaz ve dolayısıyla türev değeri istenen bir aralıkta kalır; gradyanların çok küçük olması engellenir ve gradyan sinyalinin ilk katmanlara ulaşılmasına olanak sağlanır. Şekil 4'te VGG16_BN modelinin ilk blok mimarisi verilmiştir. Diğer bloklarda benzer bir yapıya sahiptir.

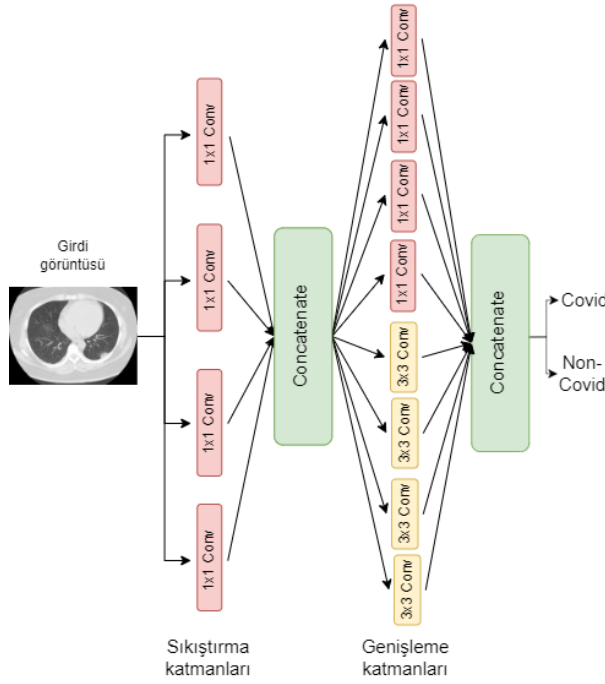


Şekil 4. VGG16_BN blok 1 mimarisi (The architecture of VGG16_BN block 1)

VGG16_GAP: VGG16'nın orijinal mimarisinde, sınıflandırma kısmı olarak adlandırılan son katmanlarda, üç tam bağlantılı katman mevcuttur. Bu katmanlardan önce, özellik haritaları düzleştirilmekte ve ardından tam bağlantılı katmanlar ile sınıflandırma yapmak için kullanılmaktadır. Ancak, bu katmanlar birçok parametre içerir ve aşırı öğrenmeye eğilimlidir. Global average pooling (GAP) kullanımı son yıllarda popüler hale gelmiştir. GAP, son özellik haritasındaki her öznelik haritasının ortalamasını alır ve böylece düzleştirme işlemine ihtiyaç duymadan, her bir özellik haritası için tek bir çıktı üretir. Bu, aşırı öğrenmeye karşı daha dirençli ve daha düşük parametrelili bir model sağlamaktadır. Özetle, VGG16-GAP modelinde, VGG16 mimarisindeki 3 tam bağlantılı katman yerine, GAP katmanı kullanılmıştır.

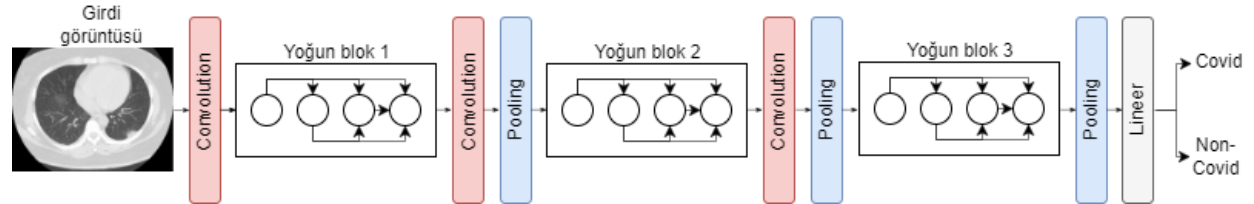
SqueezeNet [25]: Bu mimari yapısında 1x1 evrişim katmanlarını kullanarak model parametre sayısını azaltmayı sağlamaktadır. AlexNet ile kıyaslandığında model parametre sayısını 50 kat azaltmakta ve ayrıca top-1 ve top-5 kategorisinde aynı veya daha yüksek doğruluk oranları sağlamaktadır. Parametre sayısının azalması bazı avantajlar sağlamaktadır: (1) Modelin hesaplama yükü, dolayısıyla hesaplama süresi azalmaktadır, (2) Bir modeli buluttan bir araca aktarmak için daha az bant genişliği gerektirir ve (3) Sınırlı belleğe sahip FPGA'lere ve diğer donanımlara dağıtmak için daha uygundur. SqueezeNet mimarisi tasarlanırken 3 strateji izlenmiştir. İlk olarak, 3x3 filtreler 1x1 filtreler ile değiştirilmiştir; bu parametre sayısının 9 kat azalmasını sağlamıştır. İkinci olarak, sıkıştırma katmanları (squeeze layers) kullanılarak giriş kanallarının sayısı azaltılmıştır. Son olarak, diğer parametreler sabit tutulduğunda, ilk katmanlarda büyük aktivasyon haritaları (stride değeri düşük tutularak bu durum sağlanmaktadır) kullanmanın yüksek sınıflandırma performansı gösterdiği belirtilmiştir. Burada ilk iki strateji model parametre sayısını azaltmaya yönelikken, 3. strateji sınırlı bir parametreye sahip bir modelin

doğruluğunu arttırmaya yönelik sunulmuştur. Şekil 5’de belirtilen 3 stratejinin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlayan mimari verilmiştir.



Şekil 5. SqueezeNet mimarisi (The architecture of SqueezeNet)

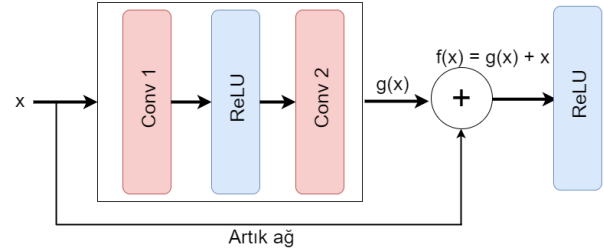
ResNet50 [26]: He ve diğerleri tarafından önerilen bu mimari ILSVRC 2015 yarışmasında top-5 hata oranı %3,57 ile en yüksek performansı elde etmiştir. CNN modellerin tanıtılması ile birlikte araştırmacılar gittikçe daha derin modeller oluşturmaya başlamıştır. Ancak, bu beraberinde



Şekil 7. DenseNet mimarisi (The architecture of DenseNet)

MobileNet-V2 [28]: Bu mimari mobil cihazlarda kullanılmak üzere tasarlanmış az parametre içeren hafif bir modeldir. MobileNet-V1’de, bir girişin her kanalı üzerinde bağımsız olarak bir uzaysal evrişimin uygulandığı derinlemesine ayrılabilir evrişim (depthwise separable convolution) katmanları kullanılmıştır. Bu katmanlar, mobil cihazlarda veya düşük hesaplama gücüne sahip araçlarda kullanıma uygun düşük boyutlu model tasarımı sağlamaktadır. MobileNet-V2 mimarisinde ise ilave olarak darboğaz (bottleneck) katmanları arasında ters çevrilmiş artık ağ yapısı (inverted residual structure) modülü kullanılmıştır. Bu modül, düşük boyutlu sıkıştırılmış bir temsili

gradyan azalması olarak adlandırılan bir problemi ortaya çıkardı. ResNet mimarisi ile tanıtılan artık ağlar (residual network) derin ağları eğitme problemini hafifletmiştir. Bu mimaride bazı katmanlar atlanarak istenen katmanlar arasında doğrudan bağlantılar oluşturulmaktadır. Şekil 6’da görüldüğü gibi “x” girdisi bir bloğa girdi olarak verilmenin yanında doğrudan bir kısa devre oluşturularak blok çıkışı ile birleştirilmektedir.



Şekil 6. ResNet mimarisinde artık ağ yapısı (The residual network structure in ResNet architecture)

DenseNet [27]: Huang ve diğerleri tarafından önerilen bu mimari, yoğun bloklar (dense blocks) aracılığıyla katmanlar arasında yoğun bağlantılar kullanan bir evrişimsel sinir ağ modelidir. İlgili mimaride, her katman kendinden önceki tüm katmanlardan girdi almakta ve kendi özellik haritalarını sonraki katmanlara aktarmaktadır. DenseNet mimarisinde önerilen yoğun bağlantılar; (1) gradyan sorununu hafifletmekte, (2) özelliklerin yayılımını güçlendirmekte ve (3) özelliklerin yeniden kullanımına olanak sağlamaktadır. Şekil 7’de DenseNet mimarisi verilmiştir.

(representation) girdi olarak almakta ve derinlikli bir evrişim ile filtrelemektedir. Tablo 1’de MobileNet-V2 mimarisi verilmiştir.

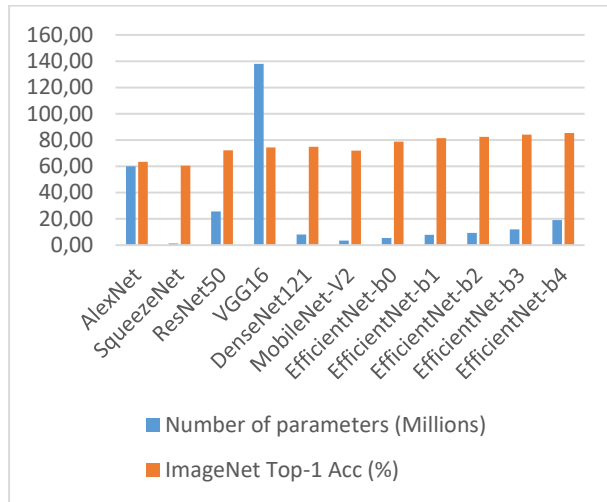
EfficientNet [29]: Bu mimari daha önceden belirtilen modellere göre daha hızlı eğitim hızına ve daha iyi parametre verimliliğine sahip bir tür evrişimli sinir ağıdır. Bu mimarideki temel farklılıklar: (1) İlk katmanlarda MBConv Block olarak da adlandırılan Inverted Residual Block ve yeni eklenen fused-MBConv kapsamlı bir şekilde kullanılmıştır, (2) MBConv blokları için daha küçük genişletme oranları kullanılmıştır; bu daha az bellek erişimine olanak sağlamaktadır ve (3) 3x3’lük küçük filtre boyutları kullanılarak model parametre

sayısının azaltılması sağlanmıştır; küçük filtre boyutu kullanımından kaynaklanan azalan receptive field'ı telafi etmek için katman sayısı artırılmıştır. Bu mimarinin B0 ve B7 arasında değişen farklı versiyonları önerilmiştir. Şekil 8'de modellerin

ImageNet veri setindeki top-1 başarıları ve parametre sayıları verilmiştir. Dikkat edilirse, EfficientNet modelleri parametre sayısı bakımından daha küçük olmasına rağmen doğruluk oranı bakımından diğer modellerin performansını geçmektedir.

Tablo 1. MobileNet-V2 mimarisi (The architecture of MobileNet-V2)

Girdi boyutu	Katmanlar	Genişleme faktörü	Kanal sayısı	Tekrar sayısı	Stride
224x224x3	Conv2d	-	32	1	2
112x112x3	Bottleneck	1	16	1	1
112x112x3	Bottleneck	6	24	2	2
56x56x24	Bottleneck	6	32	3	2
28x28xx32	Bottleneck	6	64	4	2
14x14x64	Bottleneck	6	96	3	1
14x14x96	Bottleneck	6	160	3	2
7x7x160	Bottleneck	6	320	1	1
7x7x320	Conv2d 1x1	-	1280	1	1
7x7x1280	AvgPool 7x7	-	-	1	-
1x1x1280	Conv2d 1x1	-	k	-	-



Şekil 8. Çalışma kapsamında kullanılan modellerin ImageNet verisetinde top-1 doğruluk oranları ve parametre sayısı bakımından karşılaştırılması (Comparison of the models used in the scope of the study in terms of top-1 accuracy rates and parameter numbers on the ImageNet dataset)

2.3. Eğitim Detayları (Training Details)

Çalışma kapsamında kullanılan CNN modelleri çok fazla parametre barındırmaktadır. Veri miktarının az olması durumunda genel olarak aşırı öğrenme (overfitting) problemini meydana gelmektedir. Aşırı öğrenme, bir modelin (yani fonksiyonun) bir veri setine (yani eğitim veri setine) çok yakından hizalanmasından (aligned) kaynaklı ortaya

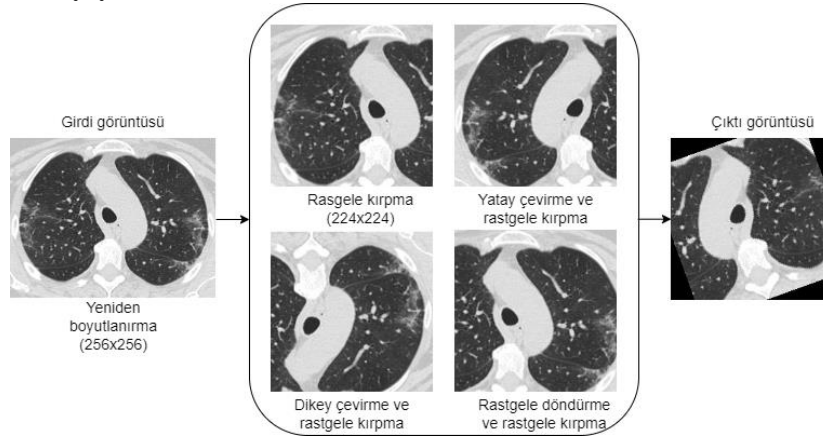
çıkılmaktadır. Sonuç olarak, model eğitim veri setinde yüksek performans göstermekte ve test veri setinde başarısız olmaktadır. Diğer bir deyişle, genelleme yeteneği zayıf kalmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmenin bir yolu veri artırma (data augmentation) tekniğini kullanmaktır. Veri artırma ilave eğitim verileri üreterek ve modeli farklı veri sürümlerine maruz bırakarak bir düzenleyici (regularizer) görevi görür. Bu kapsamda eğitim veri setinde bazı işlemler uygulanmıştır:

- Veri setindeki imgeler 256x256 çözünürlüğüne yeniden boyutlandırılmıştır (resize).
- İmgeleri modeller için tavsiye edilen 224x224 çözünürlüğüne getirmek için kırpma (crop) işlemi uygulanmıştır.
- 0.5 olasılığında yatayda çevirme işlemi uygulanmıştır.
- 0.5 olasılığında dikeyde çevirme işlemi uygulanmıştır.
- [0-20] derecelik döndürme işlemi uygulanmıştır.

Şekil 9'da bir imge üzerinden uygulanan veri artırma işlemleri örneklenmiştir. Tüm modeller sıfırdan 50 epoch boyunca eğitilmiştir; fine-tuning işlemi uygulanmamıştır. Optimizer olarak stochastic gradient descent [30] algoritması kullanılmış, batchsize 16 ve öğrenme oranı 2-e3

olarak alınmıştır. Kayıp fonksiyonu olarak CrossEntropyLoss kullanılmıştır. 2 epoch boyunca validation loss'ta düşüş olmaması durumunda

ağırlık azalması (weight decay) işlemi uygulanmış ve öğrenme oranı yarıya düşürülmüştür.



Şekil 9. Eğitim veri setinde uygulanan veri arttırma işlemleri ve üretilen sentetik imge (Data augmentation techniques applied in the training dataset and the generated synthetic images)

3. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

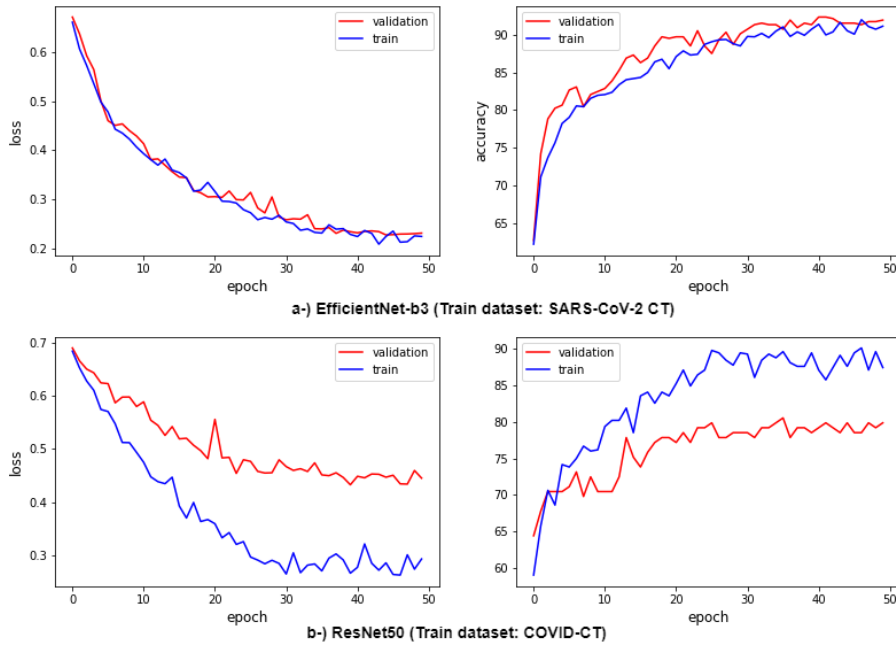
Bu çalışmada temel amacımız çapraz veri seti altında COVID-19 teşhisi için derin öğrenme modellerinin performansını karşılaştırmaktır. Bu kapsamda, ilk senaryoda tek bir hastaneden toplanan SARS-CoV-2 CT veri seti eğitim ve farklı makalelerden toplanan imgelerden oluşan COVID-CT veri seti test olacak şekilde model performansları deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, hiper-parametre optimizasyonu yapmak ve modelin en iyi performansı hangi epoch'ta sağladığını belirlemek için eğitim veri seti %80 eğitim ve %20 validasyon olarak ayrılmıştır. Eğitim detayları kısmında belirtildiği gibi validasyon kayıp değerindeki değişime bağlı olarak öğrenme oranı ayarlanmıştır. Ayrıca validasyon loss değerinin en düşük olduğu epoch'taki model ağırlık değerleri kaydedilmiş ve bu model kullanılarak COVID-CT test seti ile performansı incelenmiştir. Tablo 2'in ilk kolonunda belirtilen ayarlamalar (setting) için her bir modelin eğitim, validasyon ve test sonuçları verilmiştir. Dikkat edilirse, tüm modellerin eğitim ve validasyon performanslarının yüksek olduğu, ancak test performanslarının düşük olduğu gözlenmektedir. En iyi test skoru %68.93 ile EfficientNet-b3 modeli ile elde edilmiştir. Modeller genel olarak değerlendirildiğinde, eğitim performansları %85.13 ile %97.17 arasındayken test performansları %63.56 ile %68.93 arasında değişkenlik göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, SARS-CoV-2 CT veri seti eğitim seti olarak kullanıldığında, modelin genelleme yeteneğinin zayıf kaldığı görülmektedir.

İkinci senaryoda ise COVID-19 ile ilgili bilimsel makalelerden toplanan imgelerden oluşan COVID-CT eğitim ve tek bir hastaneden toplanan SARS-CoV-2 CT test seti olacak şekilde model performansları benzer şekilde karşılaştırılmıştır. Tablo 2'in ikinci kolonunda her bir modelin bu ayarlama için performansları verilmiştir. En iyi test skoru %71.47 ile ResNet50 modeli ile elde edilmiştir. Modeller genel olarak değerlendirildiğinde, eğitim performansları %74.66 ile %90.10 arasındayken test performansları %60.18 ile %71.47 arasında değişkenlik göstermektedir. Dikkat edilirse, daha genel bir yapıya sahip olan COVID-CT veri seti eğitim için kullanıldığında test performansının %68.93'dan %71.47'ye yükseldiği görülmektedir. COVID-CT veri setindeki çeşitliliğin ve etnik farklılığın fazla olmasından kaynaklı modellerin eğitim başarısı nispeten düşük olmasına rağmen test performansının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 10'da her iki senaryo için en yüksek performans gösteren modellerin eğitim aşamasındaki kayıp (loss) (solda) ve doğruluk (accuracy) (sağda) grafikleri verilmiştir. Şekil 10'da üstte eğitim seti olarak SARS-CoV-2 CT'in kullanıldığı ve en yüksek test skorunun elde edildiği EfficientNet-b3 modelinin eğitim/validasyon kayıp ve doğruluk grafikleri verilmiştir. Dikkat edilirse veri setinin çeşitliliğinin düşük olmasından kaynaklı dengeli (stable) bir eğitim söz konusudur. Ancak, modelin genelleme yeteneği düşüktür. Diğer taraftan, altta eğitim seti olarak COVID-CT'nin kullanıldığı ve en yüksek test skorunun elde edildiği ResNet50 modelinin eğitim/validasyon kayıp ve doğruluk grafikleri verilmiştir. Veri setinin

zorluğundan kaynaklı eğitim ve validasyon grafikleri arasında boşluk oluşmakta ve validasyon başarısı düşük kalmaktadır. Test performansına bakıldığında ise Senaryo 1'e göre daha yüksek bir skor elde edilmektedir. Bu da modelin genelleme yeteneğinin daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Çapraz veri seti değerlendirmesi altında derin öğrenme modellerinin performansının karşılaştırılması (Comparison of the performance of deep learning models under cross-validation dataset evaluation)

Modeller	Eğitim veri seti: SARS-CoV-2 CT (eğitim %80 ve doğrulama seti %20) Test veri seti: COVID-CT			Eğitim veri seti: COVID-CT (eğitim %80 ve doğrulama seti %20) Test veri seti: SARS-CoV-2 CT		
	Eğitim Perf.(%)	Val Perf.(%)	Test Perf.(%)	Eğitim Perf.(%)	Val Perf.(%)	Test Perf.(%)
AlexNet [19]	92.04	92.94	65.98	84.56	77.85	60.18
SqueezeNet [22]	90.27	92.54	66.78	85.57	76.51	66.84
VGG16 [20]	94.76	92.34	64.91	80.87	75.17	62.16
VGG16-BN	95.81	96.57	68.39	90.10	79.19	67.80
VGG16-GAP	88.0	88.91	63.83	85.03	86.38	68.61
ResNet50 [23]	96.52	96.17	66.78	89.60	80.54	71.47
DenseNet121 [24]	95.66	94.96	66.11	88.93	79.87	67.08
MobileNet-V2 [25]	85.13	86.89	64.90	76.94	77.11	67.56
EfficientNet-b0 [26]	88.10	90.93	64.64	74.66	71.14	69.7
EfficientNet-b1	88.86	91.73	65.97	77.01	76.51	70.26
EfficientNet-b2	89.06	92.54	63.56	83.49	77.18	67.84
EfficientNet-b3	91.38	92.34	68.93	78.36	78.52	69.29
EfficientNet-b4	97.17	98.39	66.78	80.37	77.18	69.37



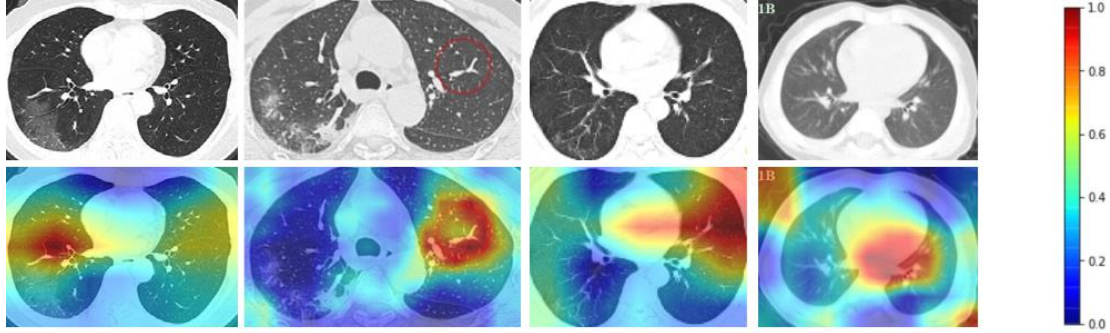
Şekil 10. Kayıp (solda) ve Doğruluk (sağda) grafikleri (Loss (left) and Accuracy (right) plots)

Literatürdeki çalışmalar ile kıyaslandığında, çapraz veri seti değerlendirmesi altında model performanslarının oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bu, COVID-19 kapsamında toplanan veri setlerinin etnik bağımlılığa sahip olduğunu

göstermektedir. Modellerin genelleme yeteneğini arttırmak için farklı ülke ve hastanelerden toplanan ortak bir veri setinin kullanılmasının daha iyi olacağı gözlenmiştir. Ayrıca, COVID-19 veri seti için model performanslarının, Şekil 8'te verilen

modellerin ImageNet veri setindeki performansları ile paralel olmadığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar ile çapraz veri değerlendirmesi altında COVID-19 tespiti için ResNet50 modelinin daha iyi performans sağladığı görülmüştür.

Eğitim işlemi tamamlandıktan sonra, CNN modelinin görüntünün sınıfına (Covid/Non-Covid) karar verirken odaklandığı alanları göstermek için Grad-CAM (Gradient weighted Class Activation Mapping) yöntemi kullanılmaktadır. Genel olarak,



Şekil 11. Grad-CAM Sonuçları (Grad-CAM Results)

4. SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu çalışmada, tek bir hastaneden toplanan görüntülerden oluşan SARS-CoV-2 CT veri seti ve literatürde yayınlanan makalelerden toplanan görüntülerden oluşan COVIT-CT veri seti kullanılarak çapraz veri değerlendirmesi altında güncel derin öğrenme modellerinin performansı karşılaştırılmıştır. Deneysel araştırmalar sonucu, eğitim seti olarak COVIT-CT kullanıldığında, eğitim performansı düşük olmasına rağmen test skorlarının daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, veri setinin daha genel ve çeşitli olmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan SARS-CoV-2 CT veri seti aynı ildeki hastaneden toplandığından, her ne kadar eğitim seti başarısı yüksek olsa da test başarısı düşüktür; bu veri seti kullanılarak eğitilen modelin genelleme yeteneğinin zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, çapraz veri seti değerlendirmesi altında %71.47 ile en yüksek skor ResNet50 modeli ile elde edilmiştir. Çalışmanın devamında, ResNet50 modelinin performansını arttırmaya yönelik araştırmalar yapılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu araştırmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

ilgili modelin en son evrişim katmanındaki özellik haritasından yararlanılmaktadır. Bu kısımda, en yüksek skorları aldığımız ResNet50 modeli kullanılarak, modelin tahmin yaparken odaklandığı bölgeler görselleştirilmiştir. Şekil 11'de elde edilen sonuçlar ve bölgelerin önemini gösteren ısı haritası (sağda) gösterilmiştir. Burada, kırmızı bölgeler modelin sınıflandırma yaparken odaklandığı kısımları, mavi bölgeler ise sınıflandırmada daha az önemli olan kısımları 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)

Yahya DOĞAN: Deneyleyi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Xu X, Jiang X, Ma C, Du P, Li X, Lv S, Yu L, Ni Q, Chen Y, Su J. A deep learning system to screen novel coronavirus disease 2019 pneumonia. *Engineering*, 2020; 6(10): 1122-1129.
- [2] Ai T, Yang Z, Hou H, Zhan C, Chen C, Lv W, Tau Q, Sun Z, Xia L. Correlation of chest CT

- and RT-PCR testing in coronavirus disease 2019 (COVID-19) in China: a report of 1014 cases. *Radiology*, 2020.
- [3] Panwar H, Gupta P. K, Siddiqui M. K, Morales-Menendez R, Singh V. Application of deep learning for fast detection of COVID-19 in X-Rays using nCOVnet. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020; 138: 109944.
- [4] Brunese, L, Mercaldo F, Reginelli A, Santone A. Explainable deep learning for pulmonary disease and coronavirus COVID-19 detection from X-rays. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2020; 196: 105608.
- [5] Das N. N, Kumar N, Kaur M, Kumar V, Singh D. Automated deep transfer learning-based approach for detection of COVID-19 infection in chest X-rays. *Irbm*. 2020.
- [6] Amyar A, Modzelewski R, Li H, Ruan S. Multi-task deep learning based CT imaging analysis for COVID-19 pneumonia: Classification and segmentation. *Computers in Biology and Medicine*. 2020; 126: 104037.
- [7] Silva P, Luz E, Silva G, Moreira G, Silva R, Lucio D, Menotti D. COVID-19 detection in CT images with deep learning: A voting-based scheme and cross-datasets analysis. *Informatics in medicine unlocked*. 2020; 20: 100427.
- [8] Saood A, Hatem I. COVID-19 lung CT image segmentation using deep learning methods: U-Net versus SegNet. *BMC Medical Imaging*. 2021; 21(1): 1-10.
- [9] Gibson E, Giganti F, Hu Y, Bonmati E, Bandula S, Gurusamy K, Davidson B, Pereira S. P, Clarrkson M. J, Barratt D. C. Automatic multi-organ segmentation on abdominal CT with dense V-networks. *IEEE transactions on medical imaging*. 2018; 37(8): 1822-1834.
- [10] Qiu T, Wen C, Xie K, Wen F. Q, Sheng G. Q, Tang X. G. Efficient medical image enhancement based on CNN-FBB model. *IET Image Processing*. 2019; 13(10): 1736-1744.
- [11] Fakoor R, Ladhak F, Nazi A, Huber M. Using deep learning to enhance cancer diagnosis and classification. In *Proceedings of the international conference on machine learning*. ACM, New York, USA. 2013; 28: 3937-3949.
- [12] Atas M, Ozdemir C, Atas İ, Ak B, Özeroğlu E. Biometric identification using panoramic dental radiographic images with few-shot learning. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2022; 30(3): 1115-1126.
- [13] Ahmet, K. A. R. A. Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Kullanarak Global Güneş Işınımı Zaman Serileri Tahmini. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2019; 7(4): 882-892.
- [14] Atas I, Ozdemir C, Atas M, Dogan Y. Forensic Dental Age Estimation Using Modified Deep Learning Neural Network. *arXiv preprint arXiv:2208.09799*. 2022.
- [15] Yetis A. D, Yesilnacar M. I, Atas M. A machine learning approach to dental fluorosis classification. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021; 14(2): 1-12.
- [16] ER M. B. Akçiğer Seslerinin Derin Öğrenme ile Sınıflandırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2020; 8(4): 830-844.
- [17] Ozdemir C, Gedik M. A, Kaya Y. Age Estimation from Left-Hand Radiographs with Deep Learning Methods. *Traitement du Signal*. 2021; 38(6).
- [18] Kontuk R, Turan M. NLP Kullanılarak Haberlerin Yaş Gruplarına Göre Sınıflandırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2020; 8(2): 372-382.
- [19] Yang X, He X, Zhao J, Zhang Y, Zhang S, Xie P. COVID-CT-dataset: a CT scan dataset about COVID-19. *arXiv preprint arXiv:2003.13865*. 2020.
- [20] Soares E, Angelov P, Biaso S, Froes M. H, Abe D. K. SARS-CoV-2 CT-scan dataset: A large dataset of real patients CT scans for SARS-CoV-2 identification. *MedRxiv*. 2020.
- [21] Deng J, Dong W, Socher R, Li L. J, Li K, Fei-Fei L. Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In *2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2019; 248-255.
- [22] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017; 60(6): 84-90.
- [23] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*. 2014.
- [24] Ioffe S, Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In *International conference on machine learning*. 2015; 448-456.
- [25] Iandola F. N, Han S, Moskewicz M. W, Ashraf K, Dally W. J, Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and < 0.5 MB model size. *arXiv preprint arXiv:1602.07360*. 2016.
- [26] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning. *Image Recognition*. 2015; 7.
- [27] Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the*

- IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017;4700-4708.
- [28] Sandler M, Howard A, Zhu, M, Zhmoginov A, Chen L. C. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018; 4510-4520.
- [29] Tan M, Le Q. Efficientnetv2: Smaller models and faster training. In International Conference on Machine Learning. 2021; 10096-10106.
- [30] Ketkar N. Stochastic gradient descent. In Deep learning with Python. Apress, Berkeley, CA. 2017; 113-132.

Experimental and Numerical Analysis of an Innovative High Power LEDs Thermal Management System, based on Heat Sink- Heat Pipe Design

Burcu ÇİÇEK^{1*}  Emre ÜRÜN²  Necmettin ŞAHİN¹ 

¹Department of Mechanical Engineering, Aksaray University, 68100, Aksaray, Turkey

²Department of Institute of Science, Aksaray University, 68100, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/06/2023
Revision: 22/07/2023
Accepted: 29/07/2023

Keywords

High power LEDs
Heat pipe
Thermal management
Ansys Fluent

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/06/2023
Düzeltilme: 22/07/2023
Kabul: 29/07/2023

Anahtar Kelimeler

Yüksek Güçlü LED'ler
Isı borusu
Termal yönetim
Ansys Fluent

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, two different coolers were designed for LEDs. The study was carried out experimentally and the experimental results were numerically validated using ANSYS Fluent software. / Bu çalışmada LED'ler için iki farklı soğutucu tasarlandı. Çalışma deneysel olarak gerçekleştirildi ve deneysel sonuçlar ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak, sayısal olarak doğrulandı.

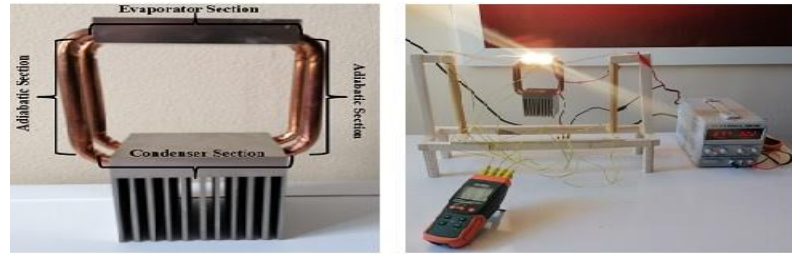


Figure A: Heat pipe and experimental set up / Şekil A: Isı borusu ve deney düzeneği

Highlights (Önemli noktalar)

- Thermal management is of utmost importance in lighting systems in which high-power LEDs are used, especially in small-sized designs. / Yüksek güçlü LED kullanılan aydınlatma sistemlerinde özellikle küçük boyutlu tasarımlarda termal yönetim büyük önem taşımaktadır.
- With the increase of LED input power, the luminous flux becomes higher, but also the junction point temperature rises. This situation renders conventional cooling systems insufficient. / LED giriş gücünün artması ile ışık akısı daha yüksek olur ancak bunun yanı sıra birleşme noktası sıcaklığı yükselmektedir. Bu durum klasik soğutma elemanlarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır.
- Different cooling methods are used for thermal management of LEDs. The heat pipe, which has many advantages over other methods, is widely preferred for the thermal management of LEDs. / LED'lerin termal yönetimi için farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Diğer yöntemlere göre birçok avantaja sahip olan ısı borusu, LED'lerin termal yönetimi için yaygın olarak tercih edilmektedir.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed minimize the junction temperature of high-power LEDs, especially of the ones used in small spaces. / Bu çalışmada özellikle küçük alanlarda kullanılan yüksek güçlü LED'lerin birleşme noktası sıcaklığını minimum değere düşürmek amaçlanmaktadır.

Originality (Özgünlük): A unique heat sink-heat pipe cooler has been designed and prototypes have been produced for the thermal management of LEDs. / LED'lerin termal yönetimi için özgün bir ısı borusu ve ısı emici kanatçık tasarlanarak prototipler üretilmiştir.

Results (Bulgular): Increasing the LED input power causes an increase in temperature in the entire system. In the system with heat sink-heat pipe, lower junction and solder point temperature values were obtained compared to the other system, which only has a heat sink with fin. / LED giriş gücündeki artış sistemin tamamında sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Isı borusu kullanılan sistemde, kanatçıklı soğutma sistemindekine göre daha düşük birleşme noktası ve lehim noktası sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): It has been observed that LEDs cooled by HSHP meet the allowable junction temperature limits at all power inputs. However, only heat sink type cooler was insufficient for 100W input power. / Isı borusu ile soğutulan LED'lerin, izin verilen bağlantı sıcaklığı standardını tüm güç girişlerinde karşıladığı gözlemlenmiştir. Ancak ısı emici kanatçığın kullanıldığı sistemde 100 W giriş gücü için izin verilen bağlantı sıcaklık değeri aşıldığı için yeterli kalmıştır.



Experimental and Numerical Analysis of an Innovative High Power LEDs Thermal Management System, based on Heat Sink- Heat Pipe Design

Burcu ÇİÇEK^{1*} Emre ÜRÜN² Necmettin ŞAHİN¹

¹Department of Mechanical Engineering, Aksaray University, 68100, Aksaray, Turkey

²Department of Institute of Science, Aksaray University, 68100, Aksaray, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/06/2023
Revision: 22/07/2023
Accepted: 29/07/2023

Keywords

High power LEDs
Heat pipe
Thermal management
Ansys Fluent

Abstract

The efficiency and lifespan of light emitting diodes (LEDs) are adversely affected by junction temperature. Therefore, it is very important to operate the LED at a low junction temperature. In this study, it is aimed to minimize the junction temperature of high power LEDs so that reliability and light output of the device can be maximized.

In the study, a heat pipe heat sink (HPHS) cooler was designed for high power LEDs. The study was carried out experimentally and the results obtained from the experimental study were also verified numerically using the ANSYS Fluent software. Total power inputs ranging between 40 W and 100 W were applied to the LEDs and the performance of the cooler within the current design in those cases was examined. To observe the effect of the heat pipe on the LED junction temperature, a heat sink without heat pipe was also designed and analysed, both experimentally and numerically. The results show that, the heat sink with fin is sufficient at low LED input powers, while at high LED input powers, the HPHS provides much more effective cooling. At the same time, the effect of different thermal interface materials on LED junction temperature was observed, by using materials with thermal conductivities of 1.8, 8.5 and 11 W/m.K for each power input. As the coefficient of thermal conductivity of the thermal interface materials increased, the temperature of the LED solder point decreased.

Isı Emici-Isı Borulu İnovatif Bir Yüksek Güçlü LED Termal Yönetim Sisteminin Deneysel ve Nümerik Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/06/2023
Düzeltilme: 22/07/2023
Kabul: 29/07/2023

Anahtar Kelimeler

Yüksek Güçlü LED'ler
Isı borusu
Termal yönetim
Ansys Fluent

Öz

Işık yayan diyotların (LED'ler) verimliliği ve ömrü bağlantı sıcaklığından olumsuz etkilenir. Bu nedenle, LED'i düşük bağlantı sıcaklığında çalıştırmak çok önemlidir. Bu çalışmada, cihazın güvenilirliğini ve ışık çıkışını maksimize edebilmek için yüksek güçlü LED'lerin bağlantı sıcaklığının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada, yüksek güçlü LED'ler için bir ısı borulu ısı alıcı (HPHS) soğutucu tasarlanmıştır. Çalışma deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak sayısal olarak da doğrulanmıştır. LED'lere 40 W ile 100 W arasında değişen toplam güç girdileri uygulanmış ve bu durumlarda soğutucunun mevcut tasarımdaki performansı incelenmiştir. Isı borusunun LED birleşim sıcaklığı üzerindeki etkisini gözlemlemek için, ısı borusu olmayan bir ısı emici de hem deneysel hem de sayısal olarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Sonuçlar, kanatlı soğutucunun düşük LED giriş güçlerinde yeterli olduğunu, yüksek LED giriş güçlerinde ise HPHS'nin çok daha etkili soğutma sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda her güç girişi için 1.8, 8.5 ve 11 W/m.K ısı iletkenliğe sahip malzemeler kullanılarak farklı termal arayüz malzemelerinin LED bağlantı sıcaklığı üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Termal arayüz malzemelerinin termal iletkenlik katsayısı arttıkça LED lehim noktasının sıcaklığı azalmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, light emitting diodes (LEDs) are becoming increasingly popular lighting sources, as a result of commercial applications and research. This is due to the advantages of LEDs such as low energy consumption, high optical efficiency, long lifespan and good controllability.

LEDs are semiconductor devices and, unlike traditional lighting, generally do not use glass and filaments [1-3]. Also, LEDs do not contain mercury like fluorescent lamps do. While the luminous efficiency of LEDs is much superior to that of incandescent lamps, it is also comparable to that of fluorescent lamps [4-9]. Today, LEDs are rapidly replacing fluorescent lamps. Like standard diodes, LEDs consist of p-type and n-type semiconductor materials that form a p-n junction.

Although usage of LEDs in lighting is not new, gradual development of LED technology and introduction of more innovative solutions make LEDs increasingly indispensable [10]. In the near future, it is thought that LEDs will replace other lighting technologies and will be effective in many fields such as clinical medicine, general lighting, industrial lighting and street lighting.

With the recent advances in technology, sizes of LEDs, like other semiconductor devices, are shrinking. This naturally causes an increase in heat dissipation, heat flux and power. When a LED is powered, the luminescence reaction takes place at the p-n point and the energy is converted into light. However, as the luminescence reaction goes on, only part of the energy is converted into luminous flux, the rest dissipates in the form of heat. During the heat generation, the joint on the device is the highest temperature point within the device. The temperature at this point is referred as the junction temperature. The junction temperature of a LED is vital because lifespan and luminous flux are dependent on it.

If the heat generated in a LED is not properly dissipated, this will cause an increase in the junction temperature of the bulb. If the temperature gets excessively high, optical and energy efficiencies and bulb life are considerably reduced [11]. Therefore, effective thermal management is strongly needed, in the operation of high power LEDs. Thanks to thermal management, failure risk is reduced and it is ensured that the LEDs operate safer and provide better light quality. Many methods are used for thermal management of LEDs. For example, natural convection heat sinks are widely

used to cool LED packages. Heat sinks do not consume additional energy and do not expose the system to acoustic and overload problems. The purpose of adding a heat sink to LED systems is to allow heat transfer to the ambient environment for keeping the junction at a lower temperature. In [12-14], heat transfer by natural convection with the aid of heat sinks were investigated both numerically and experimentally. There are also a number of recent studies aiming to control heat dissipation using heat sinks.

Studies have shown that effective thermal management of LEDs is strongly dependent upon the fin structure, fin geometry and also the materials placed under the heat sinks [15-16]. The thermal interface material, whose function is reduction of the thermal resistance between the LED and the heat sink, is very important in transmitting the excess heat in the LED. Tang et al. [17] numerically investigated the variation of the thermal resistance with respect to thermal interface materials. In another study by Abdelmlek et al. [18], insufficient thermal interfacial material was improved.

In recent years, usage of heat pipes, especially for effective heat dissipation in high-power LEDs, is also very common due to their very high coefficient of thermal conductivity. Moon et al. [19] used a U-shaped straight aluminum heat pipe to remove heat from a 100W COB LED lamp. They investigated the heat transfer properties of the heat pipe with two condensers. Sosoï et al. [20] designed a cylindrical heat pipe to cool high-power LEDs and numerically analyzed it for certain conditions. They assessed the resulting junction temperatures. Joshi et al. [21], numerically investigated a model to simulate the slurry flow and the solid particulate matter transportation, which are varied by flow parameters. Çiftçi [22], investigated thermal effects of nanofluids on heat pipe experimentally.

Huang et al. [23] designed a grooved heat pipe fin for high power LEDs used in the automotive industry. They analyzed their system in ANSYS software with different heat sinks and printed circuit board materials, as well as different fin geometries. Wang et al. [24] fabricated a tubular oscillating heat pipe formed with sintered copper particles in a flat plate evaporator for thermal management of high power LEDs. The thermal performance of the oscillating heat pipe and the light and temperature distribution of the LED array have been experimentally tested and calculated. The thermal resistance obtained 0.168 W/m.K and the maximum LED temperature was below 70 °C for 60 W LED input power. Lu et al. [25] designed a heat pipe-

heatsink system for the high-power LED package. The thermal resistance of the LED package has been tested experimentally. Tang et al. [26] experimentally investigated an active cooling system with heat sink-heat pipe for high-power automobile LED lighting.

In our study, a heat pipe heat sink (HPHS) is designed for cooling high power LEDs. The system is designed in such a way that four C-shaped copper heat pipes are integrated into the evaporator and condenser area of the aluminum heat sink. The system is manufactured according to the design and four high-power COB LEDs are mounted on top of the upper heat sink to dissipate the generated heat. The aim of the study is to keep the junction temperature of high power LEDs below the specified limit. This is because if the junction temperature exceeds this limit, which can happen at high powers, the optical efficiency and operational life of the LED begin to deteriorate. In the study, different power values from 40 W to 100 W in total were applied to the high-power LEDs and temperature values were measured at certain points until the system reaches the steady-state. By using the parameters such as measured temperature values and LED input powers, the junction temperature, which is important for the LEDs thermal performance, has been calculated. In addition, the effect of coefficient of thermal conductivity of the thermal interface materials, which were placed between the LEDs and the heat sink, are evaluated.

Today, both technological developments and architectural concerns favour smaller sized designs in electronic devices. In this context, it is thought that the current study will provide an innovative solution for thermal management in lighting applications, especially in restricted spaces where high luminous flux is required.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The study consists of two parts including thermal analysis of the heat sink-heat pipe cooler and the heat sink without heat pipe cooler. In the first part, the designed cooler models were manufactured and experimental measurements were carried out. In the second part, the thermal behavior of the designed cooler models has been simulated in Ansys.

2.1. Experimental Study (Deneysel Çalışma)

In this study, two different designs were used and their cooling performances were tested for high power LEDs. In the first design, four identical C-shaped copper heat pipes were used. A screen mesh

wick structure is utilized to provide capillary effect and thermal conductivity inside the heat pipes. Distilled water was selected as the working fluid. The characteristics of the heat pipe used in the study are listed in Table 1.

Table 1. Heat pipe specifications (All lengths in mm) (Isı borusu özellikleri)

Length of the heat pipe	229
Length of the evaporation zone	62
Length of the adiabatic zone	105
Length of the condensation zone	62
Outer diameter of the heat pipe	8
Inlet diameter of the heat pipe	7.25
Working fluid	Water
Wick type	Screen Mesh
Mesh size	200 Mesh/in

In the first design, the LEDs were located on the top of the heat sink which houses the evaporator zone of heat pipe (figure 1). Fins were also added on the bottom of the heat sink which houses the condenser of the heat pipe to increase heat transfer.

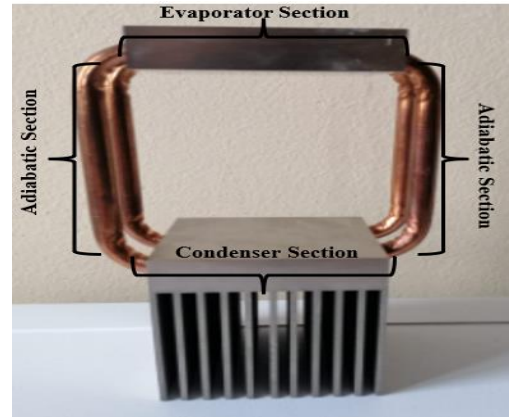


Figure 1. Heat sink-heat pipe system for cooler (Soğutma için ısı emici-ısı borulu sistem)

In the second design, the LEDs are mounted on top of the heat sinks without heat pipe as seen in figure 2. Aluminum fins were installed at the heat sink's bottom side.



Figure 2. Heat sink with fins for cooler (Soğutma için kanatçıklı ısı emici)

COB LEDs were used in the study. The LEDs were soldered so that the COB LEDs could be electrically powered. TT-TECNIC RXN 605D model adjustable power supply, which provides power up to 60 volts voltage and 5 ampere current, was used to feed the LEDs with parallel electrical connections.

Four K type thermocouples were used for temperature measurements. Thermocouples were connected to the Extech SDL200 datalogger to record the temperature measurement values at specific time intervals. Starting from the application of electrical power to the LEDs, measurements were taken until thermal equilibrium was established. During the experiment, the ambient temperature and the air speed were measured as 24.5 ± 0.3 °C and 0.1 m/s, respectively. In Figure 3, the experimental setup is depicted.

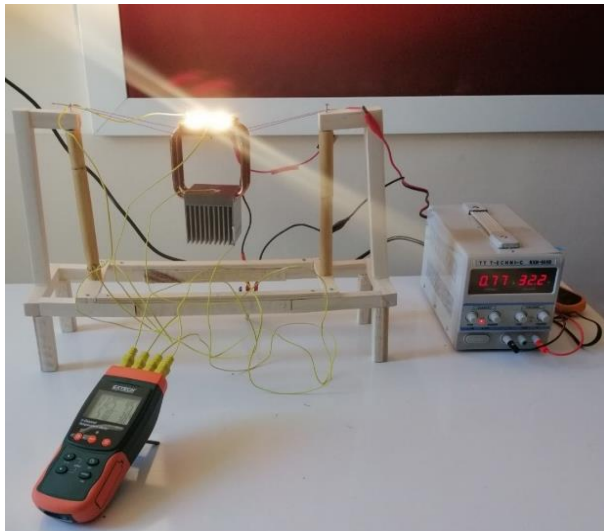


Figure 3. View of experimental set up (Deneysel kurulunun görünümü)

Experimental uncertainty (Deneysel belirsizlik)

Experimental uncertainty is basically defined as the random error in a measurement. Uncertainties are thought to be due to the variations in electrical power input and errors in instrument calibrations. In uncertainty analysis, the approach proposed by Kline[27] and a root of sum of squares (RSS) method based approach [28] has been taken. The thermocouples can measure the temperature within a ± 0.1 °C error range. Therefore absolute uncertainty related to the temperature measurement, dT , is taken as 0.1 °C. The error in the voltage measurement (dU), the error in the current measurement (dI) and the SD card resolution (dT_{data}) were taken as, ± 0.5 Volt, ± 0.5 Ampere and ± 0.1 °C, from the respective device specification. The total uncertainty related to the temperature measurement (U_T) is expressed as equation (1), taking all uncertainties. Here, T_{ave} indicates the average value at each temperature measuring point. As a result of the calculations, it was seen that the uncertainty value changed between 1.3% and 2.4%.

$$U_T = \sqrt{\left(\frac{dT}{T_{ave}}\right)^2 + \left(\frac{dT_{data}}{T_{ave}}\right)^2 + \left(\frac{dU}{U}\right)^2 + \left(\frac{dI}{I}\right)^2} \quad (1)$$

U_T : Total uncertainty related to the temperature measurement

dT : Absolute uncertainty related to the temperature measurement

dU : Uncertainty related to the voltage measurement

dI : Uncertainty related to the current measurement

dT_{data} : SD card resolution

T_{ave} : Average temperature

2.2. Numerical Solution (Nümerik Çözüm)

Geometry and mesh structure (Geometri ve mesh yapısı)

Model files are formed using Design Modeling of ANSYS 19.1 The simulation was done using ANSYS Fluent package. For meshing, The Patch Conforming Method was used. In this method, a dedicated tetrahedral mesh is created. Compared to other sub-methods of The Patch Conforming method, such as Multizone, Hexagonal Dominant and Sweep, it has been observed that tetrahedral

meshing captures the curvatures more accurately [29]. The Patch Conforming Method enables the meshing to be refined when needed and allows fast computation while preserving larger cells. The mesh creation process starts from the edges, then it continues from the surfaces and towards to volumes in the end. All surfaces and boundaries are matched to each other and this allows for high quality mesh structures. While creating the mesh structure, some quality parameters are required to be in the desired range. The shape of the cell is important for accurate analysis. Accordingly, in order to create a high quality mesh, the Skewness value, which is defined as the difference between the shape of the cell and the shape of an equilateral cell with an equivalent volume, is desired to be lower than 0.96 and the Aspect Ratio, which is the ratio of the minimum element edge length to the maximum element edge length, is also desired to be less than 100 [30]. In addition, the mesh orthogonal quality value also gives important clues about the mesh quality. Orthogonal quality ranges from 0 to 1. Orthogonal quality values closer to 1 indicate higher quality mesh structures. The mesh quality parameter values obtained for both designs are given in Table 2.

In order to get the most accurate mesh element number, the mesh independence study was performed. In Figure 4, the LED solder point temperatures with respect to the mesh structure, which was created by using different element sizes for both designs, are plotted.

Table 2. Mesh quality parameters (Mesh kalite parametreleri)

Mesh	First Model	Second Model
Element numbers	1346081	953461
Nodes numbers	255343	172556
Aspect ratio, min	1.05	1.16
Aspect Ratio,max	14.43	15.08
Skewness, max	0.89	0.85
Orthogonal quality, ave	0.74	0.75

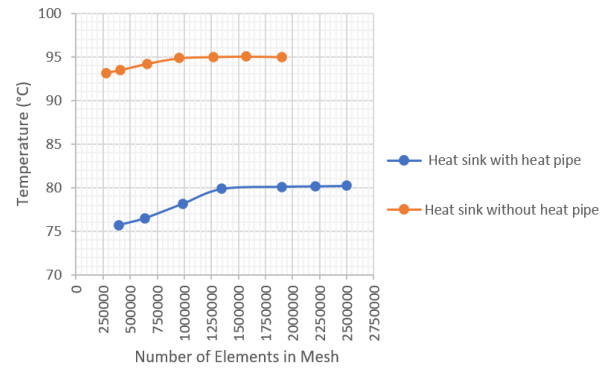


Figure 4. Mesh independence study for both designs (Her iki tasarım için mesh bağımsızlık çalışması)

Accordingly, the optimal mesh element numbers were found as 1346081 and 953461 for the first and the second design, respectively. In figure 5 and figure 6, mesh structures of both designs are depicted.

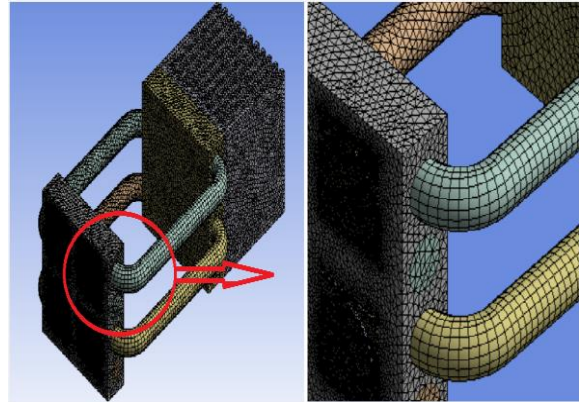


Figure 5. Mesh structure of HPHS with fins (Kanatçıklı HPHS'nin mesh yapısı)

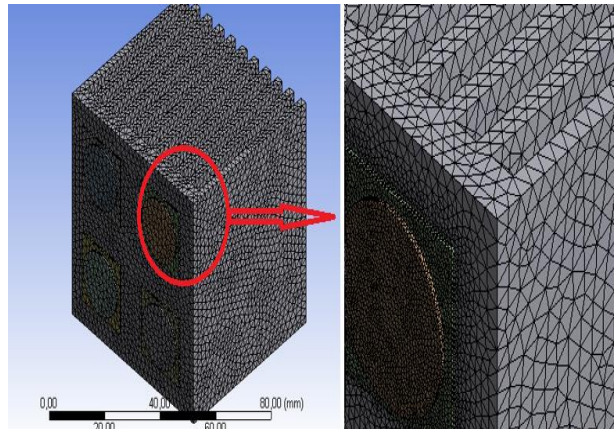


Figure 6. Mesh structure of heat sink with fins (Kanatçıklı ısı emicinin mesh yapısı)

Solution method and technique (Çözüm metodu ve tekniği)

Using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis, experimental results can be verified. The simulation is used to transform the Navier-Stokes equations into difference equations and obtain

solutions based on numerical analysis techniques. In the study, ANSYS Fluent 19.1 software was used to conduct numerical analyzes under different conditions. In order to compare experimental results with the simulation results, the following assumptions were made:

- All phase changes took place in incompressible flow.
- The steam flow created a turbulence.
- Except for heating and cooling, the heat pipe was adiabatic.

Governing equations (Korunum denklemleri)

In the heat pipe, Governing Equations including the energy, mass and momentum equations are solved in ANSYS Fluent to describe the fluid’s motion during the evaporation and condensation process. The VOF (Volume of Fluid) method is used for interface calculations. In multiphase flows, adjacent phases do not have static interfaces. This means, in the phase interfaces, physical properties, e.g. viscosity, exhibit a variation. These facts cause a heavy computational workload. Therefore, numerical solutions based on the finite volume method are harder to perform for multiphase flows than they are for single phase flows. In the VOF technique, a solution is reached by defining the movement of all the phases and interfaces. In order to track the motion of each phase, the VOF model defines their volume fractions and makes use of a Navier-Stokes equation set.

Conservation equation formulas are given below.

Conservation of Mass:

$$\frac{\partial(qu)}{\partial x} + \frac{\partial(qv)}{\partial y} + \frac{\partial(qw)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Conservation of Momentum:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(qu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(quv)}{\partial y} + \frac{\partial(quw)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(quv)}{\partial x} + \frac{\partial(qv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(qvw)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial y} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(quw)}{\partial x} + \frac{\partial(qvw)}{\partial y} + \frac{\partial(qw^2)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(q - q_0) \end{aligned} \quad (5)$$

Conservation of Energy:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(quT)}{\partial x} + \frac{\partial(qvT)}{\partial y} + \frac{\partial(qwT)}{\partial z} \\ &= \frac{k}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Convergence criteria (Yakınsama kriteri)

The VOF model depends on whether each cell in the field is used by one phase or two phases combined. Ansys Fluent is not capable of simulating phase changing materials when they undergo evaporation or condensation.

Evaporation, condensation and phase changes in the heat pipe are considered by utilizing User Defined Functions (UDF) in Fluent software. UDF is required especially for necessary calculations of mass and heat transfer between vapor and liquid phases, as naturally occurring during the condensation and evaporation. The model makes the calculations by using energy and continuity equations. For this purpose, the source terms in the governing equations are used. Mass and Energy terms are defined in the UDF and associated with conservation equations in Fluent. The volume fraction of each phase in the cells was defined by the VOF model. There are three possible conditions in the VOF model:

- $\alpha_L = 1$, The entire of heat pipe is in liquid phase T_l : Liquid temperature
- $\alpha_L = 0$, The entire of heat pipe is in vapor phase T_{sat} : Saturation temperature
- $0 < \alpha_L < 1$, ΔH : Enthalpy difference

The fluid in the heat pipe is between liquid and vapor phase [31].

In the evaporation process, in order to calculate the mass transfer, two mass terms are required: the mass added to the vapor phase and the mass subtracted from the liquid phase. The converse applies for the condensation process. The equations defining vapor-to-liquid mass transfer are listed in Table 3. Source terms were derived by De Schepper et al. [32] to be incorporated into the governing equations used by the VOF model in Fluent Ansys.

Table 3. Source term for vapor-to-liquid mass transfer[32] (Buhardan sıvıya kütleli geçiş için kaynak terimi)

Evaporation	
Liquid phase	$S_M = -0.1\alpha_l\rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}$
Vapor phase	$S_M = 0.1\alpha_l\rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}$
Condensation	
Liquid phase	$S_M = 0.1\alpha_v\rho_v \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}$
Vapor phase	$S_M = -0.1\alpha_v\rho_v \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}$

In the heat transfer, a single source term is sufficient for both phases. It is obtained by multiplying the mass source terms by the latent heat. Source terms for heat transfer are given in Table 4.

Table 4. Source term for the energy transfer from vapor to liquid phase[32] (Buhardan sıvıya enerji geçişi için kaynak terimi)

Evaporation	$S_E = -0.1\alpha_l\rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}} \Delta H$
Condensation	$S_E = 0.1\alpha_v\rho_v \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}} \Delta H$

S_M : Mass source term

S_E : Energy source term

ρ_l : Liquid density

ρ_v : Vapour density

α : Liquid phase ratio

α_v : Vapor phase ratio

A steady-state model of the dynamic behavior of the two-phase flow and the heat transfer from the fins by natural convection has been developed. For the VOF model, the maximum number of Courants used near the interface is taken as 200, as advised in [31]. In the simulation, the “Second Order Upwind Scheme” was used to solve the energy and momentum equations and the “SIMPLE Algorithm” was selected for modelling the relation between the pressure and the velocity. When the “scale residual” for the energy and mass components reached 10^{-5} , it is assumed that the convergence criterion is satisfied.

In the study, water vapor was defined as the first phase and liquid water was defined as the second phase. For the heat and mass transfer calculations during the vaporisation and liquefaction processes, the boiling point and the latent heat of evaporation values were entered (as UDF code) as 373 K and 2260 kJ/kg, respectively.

Boundary conditions (Sınır koşulları)

The operating pressure is set to 400,000 Pa with a surface tension coefficient of 0.070 for the phase interaction. The phase change propagated along the direction of the heat pipe with a velocity of 0.01 m/s. Natural convection assumptions are applied for heat transfer on the cooler side. The heat transfer coefficient of the air in the cooler side is taken as 10 W/m.K. The heat transfer coefficient (h) is assumed to be zero in other parts of the system. Natural convection assumptions also apply for heat transfer on the heat sink.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In the experimental study, temperature measurements were done at certain points for determining the cooling performance of the HPHS system. In order to determine the thermal performance of the HPHS, total power values of 40, 60, 80 and 100 W were applied to the LEDs mounted on it.

The measurements continued until the system reached thermal equilibrium, for each input power. Data were recorded in the data logger at intervals of 2 s for approximately one hour. The measurement values for 100 W LED input power are given in Figure 7. Here, T1 is the solder point temperature of the LED chip, T2 is the bottom surface temperature of the heat sink where the heat pipe evaporator is located, T3 is the bottom surface temperature of the heat sink where the heat pipe condenser is located and T4 is the fin tip temperature. According to this chart, temperature increases were observed at each measurement point, after the application of thermal power to the LEDs. Since the LED solder point is the closest point to the heat source, the temperature increase on LED solder point was quicker than the increase at other measurement points. Heat, in later times, with the effect of the heat pipe, started to be transferred from the LED to the fin. It was observed that, at T2, T3 and T4 points, the temperature first increased up to a certain value and then it was stabilized. Similar pattern in time-dependent temperature distribution was also observed in the tests with different input powers to the LED.

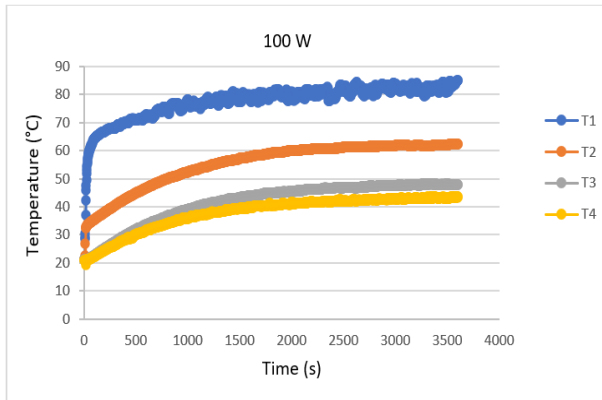


Figure 7. Time dependent temperature value at certain points for 100 W LED input power (100 W'lık LED giriş gücü için belirli noktaların zamana bağlı sıcaklık değerleri)

In Figure 8, the final results at the four measurement points above the heat pipe- heat sink are given for different LED input powers. According to this chart, it is seen that the temperature difference in the heat pipe increases as the power given to the LEDs increases. LED solder point temperatures were measured as 60.8, 68.4, 75.2 and 83.8 °C for LED input powers of 40, 60, 80 and 100 W, respectively.

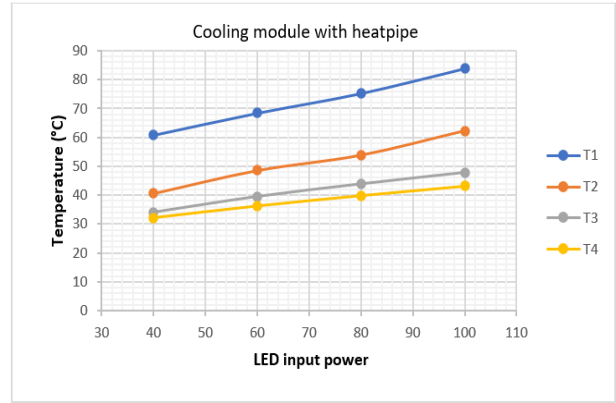


Figure 8. Temperature values at certain points for different LED input power (Farklı LED giriş güçleri için belirli noktadaki sıcaklık değerleri)

ANSYS 19.1 software was used for verification of experimentally measured temperature values. The HPHS design was drawn in ANSYS Workbench and simulated in ANSYS Fluent with the same boundary and initial conditions as the experimental system. In Figure 9, charts provided by the software, depicting the temperature distribution for each input power, are given.

It was seen that the results obtained from the numerical simulation and experimental study were compatible with each other, and there was a small relative difference of about 0.994% between the measured and simulated temperature values. The difference was calculated by R2 squared regression in Excel. It was seen that the results obtained from the numerical simulation and experimental study were compatible with each other, with a coefficient of determination (R^2) value of 0.994

LED solder point temperature (T1), is critical in calculating the junction temperature. In Figure 10, the solder point temperatures obtained in the experimental (T1) and numerical (T1') studies are given, for various LED input powers. As seen in the chart, while the soldering point temperature was approximately 60° C at 40 W LED input power, this value increased to 67, 74 and 82° C at 60, 80 and 100 W, respectively.

When comparing the temperature values at the soldering point obtained in the experimental and numerical studies, it is seen that the maximum difference between the two was 3.6 °C. The difference is calculated as 2.5, 2.7 and 3.6 °C for 60, 80 and 100 W LED input powers, respectively. It is clear that the soldering point temperature values obtained in both methods are very close to each other.

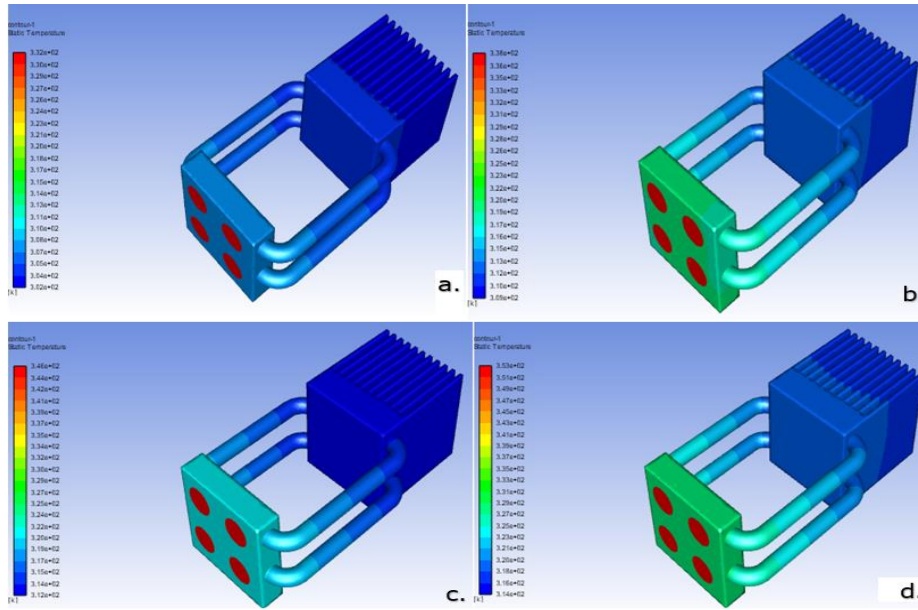


Figure 9. Temperature distributions for a. 40 W LED input power, b. 60 W LED input power, c. 80 W LED input power, d. 100 W LED input power (a. 40 W LED giriş gücü için, b. 60 W LED giriş gücü için, 80 W LED giriş gücü için, 100 W LED giriş gücü için sıcaklık dağılımı)

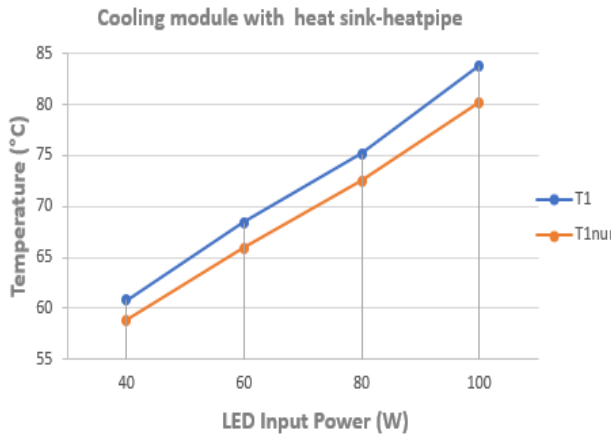


Figure 10. Soldering point temperatures for different LED input powers in experimental and numerical study (DeneySEL ve sayısal çalışmadaki farklı LED giriş güçleri için lehimleme noktası sıcaklığı)

In order to see the effect of the heat pipe on the cooling performance in the HPHS, only an heat sink with fin design was also manufactured as a second design. The second design was tested experimentally and numerically with the same boundary conditions and the same LED input powers. In Figure 11, temperature values obtained from the experimental study of the second design, for 40, 60, 80 and 100 W LED input powers, at certain measuring points are given. LED solder point temperatures were measured as 65.5, 76.3, 87.4 and 98.2°C for LED input powers of 40, 60, 80 and 100 W, respectively.

In the chart, T1' is the LED solder point temperature, T2' is the Electronic Circuit Board temperature, T3' and T4' are the temperatures at the bottom and top points of the fin structure, respectively.

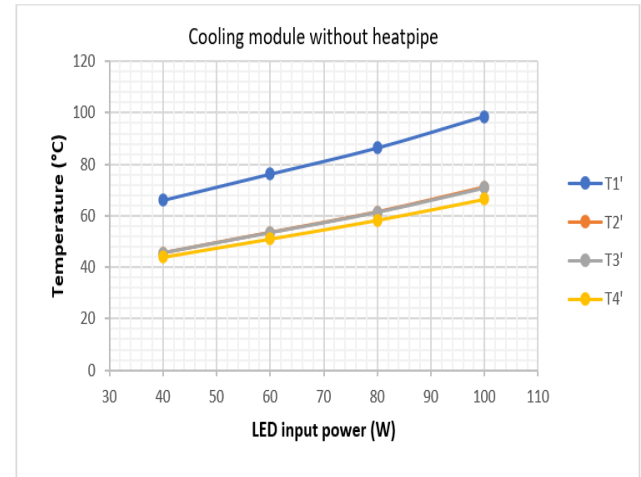


Figure 11. Temperature value of certain points for different LED input power (Farklı LED giriş güçleri için belirli noktalardaki sıcaklık değeri)

In Figure 12, the temperature distribution obtained from the simulation at different LED input powers for the secondary design is given. LED solder point temperatures were calculated as 58.8, 65.9, 71 and 95.2 °C for 40, 60, 80 and 100 W LED input powers, respectively. It is seen that the results obtained from the experimental and numerical modeling for the second design are compatible with one of them. The

coefficient of determination(R^2) was calculated as 0.998, very similar to the first design.

In figure 13, the soldering point temperatures obtained in experimental (T1) and numerical (T1') studies are given. for various LED input powers on the second design. As seen in the chart, while the soldering point temperature was approximately 65° C at 40 W LED input power, this value increased to 75, 85 and 96° C at 60, 80 and 100 W, respectively. When comparing the temperature values at the soldering point obtained in the experimental and numerical studies, it is seen that the maximum difference between the two was 2.3 °C. This value is determined as 2.3, 2.6 and 3.2 °C for 60, 80 and 100 W LED input powers, respectively.

One of the most important parameters defining the thermal performance of LEDs is the junction temperature. The junction temperature cannot be measured directly and can be determined by the following equation [33].

$$T_j = T_s + P * R_{j-s} \quad (7)$$

T_j : Junction teperature

T_s : Soldering point temperature

R_{j-s} : Thermal resistance from the LED junction point to the soldering point

P : LED input power

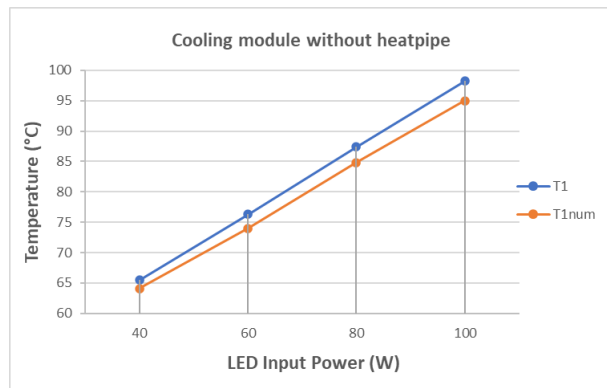


Figure 13. Soldering point temperatures for different LED input powers in experimental and numerical study (Deneysel ve sayısal çalışmadaki farklı LED giriş güçleri için lehimleme noktası sıcaklığı)

Here T_{j-s} is the soldering point temperature, R_{j-s} is the thermal resistance from the LED junction point to the soldering point. The latter value is usually provided in the datasheet of the LEDs. The R_{j-s} value of the Lumileds Luxeon 1208 model COB LED used in this study was read from the datasheet

as 0.29 W/°C [34]. The T_s value can be taken into account by measuring it directly. P stands for LED power.

Junction temperature values are calculated by using the measured temperature values and the different power values of 40, 60, 80 and 100 W of the LEDs both designs. The allowable limit for junction temperature is 120 °C for the COB LEDs used. When the chart in figure 14 is examined, the junction temperature of LEDs cooled by HPHS is seen to stay below the allowable limit even for 100W input power. For the same input power, the LED junction temperature of the LEDs cooled by heat sink with fin only is calculated as approximately 125°C. This value is above the allowable junction temperature limit. In other words, it has been observed that, heat sink with fin alone cannot provide sufficient cooling. For all the other power inputs of the LED, the junction temperature of the LEDs used with the HPHS is lower than those of heat sink with fin. It may be thought that keeping the junction temperature below the maximum allowable limit suffices but indeed every reduction in it translates into longer LED lifespan and better optical efficiency. Therefore, it is recommended to use the first design, especially at high input powers.

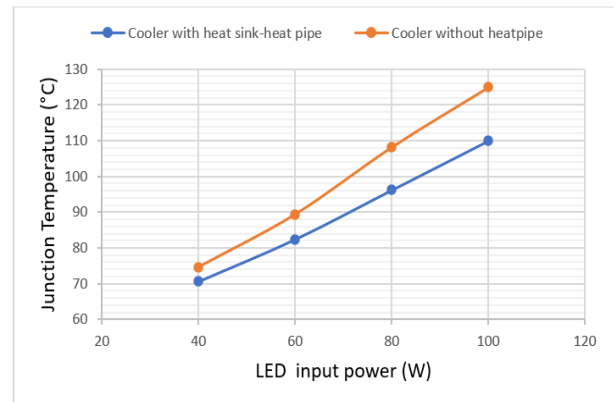


Figure 14. Junction temperature for different LED input power (Farklı LED giriş güçleri için jonksiyon sıcaklıkları)

When we compare this study to the existing literature, we observe that it has a significant novelty value. For example, Zhang et al. [35] used a copper based plate with an aluminum radiator, which is of larger size than our designs. Their design managed to cool the copper base of the LED under 100 W heat power load down only to 100.5 C. In another study, Lu et al. [36] improved a loop heat pipe for thermal management of high power LED's. The maximum temperature of the heat pipe didn't exceed 100 °C for 100 W LED heat load.

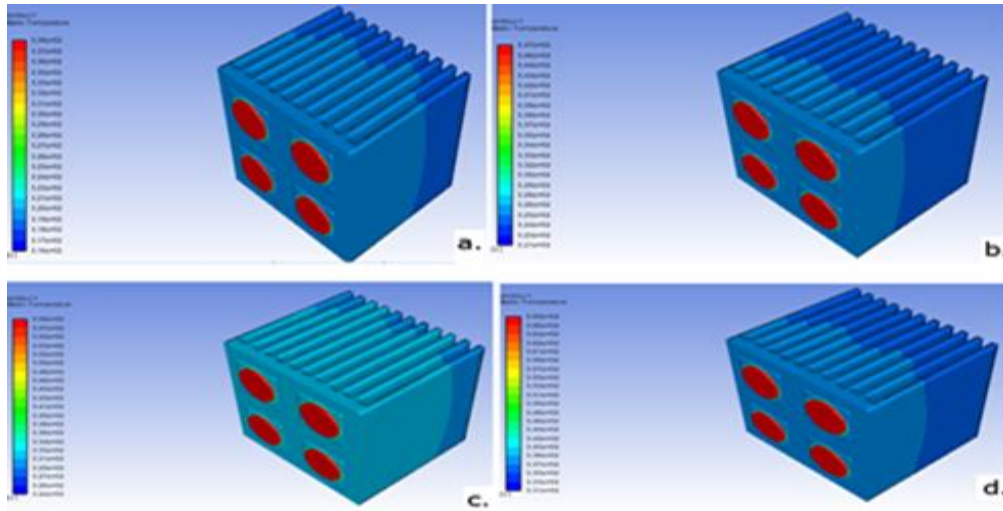


Figure 12. Temperature distubitions for a. 40 W LED input power, b. 60 W LED input power, c. 80 W LED input power, d. 100 W LED input power (a. 40 W LED giriş gücü için, b. 60 W LED giriş gücü için, 80 W LED giriş gücü için, 100 W LED giriş gücü için sıcaklık dağılımı)

In electronic cooling, air gaps between the heat generating electronic components and the heat sink adversely affect the heat transfer from the electronic component to the heat sink. In order to reduce the additional thermal resistance created by the interface between the LED and the heat sink, a thermal interface material is used. Thermal interface materials consist of thermally conductive polymer or silicon matrix particles [37]. In this study, thermal interface material with a thermal conductivity of 11 W/m.K was used in both designs. The resulting temperature values are given in Figure 15. In addition, thermal interface materials with thermal conductivities of 1.5 and 8.5 W/m.K, were used for the heat pipe -heat sink with a total LED power of 100 W and their effects on cooling performance were compared.

According to the measurements, the temperature at the solder point, which is the closest measurement point to the LED junction point, varies inversely with the thermal paste's coefficient of thermal conductivity. When a thermal paste with a thermal conductivity coefficient of 1.8 W/m.K was used, T1 soldering point temperature was measured as 106.4 °C under 100W LED input power. When thermal paste is replaced with a one that has a thermal conductivity coefficient of 8.5 W/m.K and 11 W/m.K were used, it declined to 87.9 and 83.8 °C, respectively.

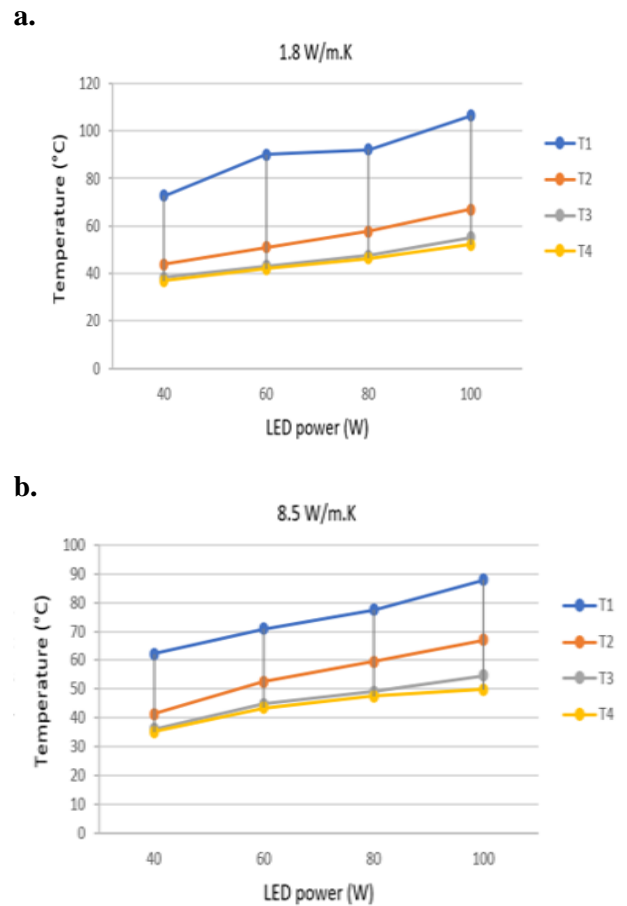


Figure 15. a, For 1.8 W/m.K and b, for 8.5 W/m.K heat conduction coefficient of thermal paste, variation of temperature at measurement points for different LED power inputs (Isı taşınım katsayısı a. 1.8 W/m.K ve b. 8.5 W/m.K olan temel macunlar için farklı LED giriş güçlerinde ölçüm noktalarının sıcaklık değişimi)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, a HPHS acting as a passive cooler for light emitting diodes (LEDs) was designed, manufactured and experimentally tested. The results of the experimental study was also verified by numerical analysis in the ANSYS Fluent software. The heat pipe is particularly advantageous for high-power microelectronic systems, as it has no moving parts, no additional energy input requirement, a low maintenance cost and a high thermal conductivity. In the cooling of micro-sized but high-power LEDs, it is crucial that the cooler is compact in size, especially in the areas where the architectural structure is the primary focus and thus the space is restricted. Compactness will also help keeping the material costs low. For a better understanding of the thermal effect of the heat pipe, its performance was compared to the performance of a heat sink with fins type of cooler. The heat dissipation capabilities of both designs were investigated for various LED power inputs. Here are the conclusions that can be drawn:

- It has been observed that LEDs cooled by heat pipe- heat sink type cooler met the allowable junction temperature standard at all power inputs, but the heat sink with fin exceeds the allowable junction temperature value at 100 W input power and is not sufficient at such high power inputs.
- While the differences between the LED junction temperatures of the designs were as low as 4 °C at a lower power input such as 40 W, it increased to 7, 12 and 15 °C, respectively, at the 60, 80 and 100 W power inputs.
- It can be said that the design with a heat sink with fins type cooler is a better option at lower power inputs, because it can satisfy the criteria at a lower cost, whereas the design with HPHS type of cooler is the better option at high powers because it becomes the only option that satisfies the criteria.
- The effect of thermal pastes with different heat transfer coefficients used on the interfaces between LED and heat sink on the LED junction temperature was investigated. When thermal paste with 11 W/mk heat transfer coefficient was used instead of 1.8 w/m.k thermal paste a decrease of approximately 22.6 °C in the junction temperature was observed. This showed the importance of the thermal conductivity coefficient of the thermal interface material.

- The junction temperature was calculated as 110 °C for 100W LED input power for the first design (heat sink heat pipe). Since this value is below the LED junction temperature limit, the design is considered to provide sufficient cooling.
- The junction temperature was calculated as 125 °C for 100W LED input power for the second design (heat sink without heat pipe). This value exceeds the LED junction temperature limit. Therefore, it can be said that the cooling capacity of the second design is not sufficient for 100W LED input power.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The present work was financially supported by Aksaray University Scientific Research Coordinator under Research Project, number of Project: 2021-30./ Çalışma Aksaray Üniversitesi BAP birimi 2021-30 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Burcu Çiçek: She performed numerical analyses, the results and the writing process.

Nümerik analizleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

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

Necmettin ŞAHİN: He analyzed the results and performed the writing process.

Deneysel ve nümerik sonuçları değerlendirmiş 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]Hamida M.B.B., Almeshaal M.A., Hajlaoui K., Rothan Y.A., A Three-Dimensional Thermal Management Study for Cooling a Square Light Edding Diode, Case Studies In Thermal Engineering, 27 (2021) 101223.

[2]Hamida M.B.B., Charrada K., Three Dimensional Dynamic Study Of a Metal Halide Thallium Iodine Discharge Plasma Powered by a Sinusoidal and Square Signal, The European Physical Journal D, 70 (2016), 1-8.

[3]Araoud Z., Ben-Ahmed R., Ben-Hamida M.B., Franke S., Stambouli M., Charrada K., Zissis G., A Two- Dimensional Modeling of the Warm-Up Phase of a High-Pressure Mercury Discharge Lamp, Physics Of Plasmas, 17(6)(2010) 063505.

[4]Zhang K., Li M.J., Wang F.L., He Y.L., Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer of W-Type Fin Arrays, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 152 (2020) 119315.

[5]Wang J., Zhao X.J., Cai Y.X., Zhang C., Bao W.W., RETRACTED: Experimental Study on the Thermal Management of High-Power LED Headlight Cooling Device Integrated with Thermoelectric Cooler Package, (2015) 532-540.

[6]Yang K.S., Chung C.H., Tu C.W., Wong C.C., Yang T.Y., Lee M.T., Thermal Spreading Resistance Characteristics of a High Power Light Emitting Diode Module, Applied Thermal Engineering, 70(1)(2014) , 361-368.

[7]Shen L., Tu Z., Hu Q., Tao C., Chen H.,The Optimization Design and Parametric Study of Thermoelectric Radiant Cooling and Heating Panel, Applied Thermal Engineering, 112 (2017) 688-697.

[8]Jang D., Yu S.H., Lee K.S., Multidisciplinary Optimization of a Pin-Fin Radial Heat Sink for LED Lighting Applications, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(4) (2012), 515-521.

[9]Costa V.A., Lopes A.M., Improved Radial Heat Sink for Led Lamp Cooling, Applied Thermal Engineering, 70(1) (2014) 131-138.

[10]Hoelen C., Borel H., de Graaf J., Keuper M., Lankhorst M., Mutter C., Wegh R., Remote Phosphor LED Modules for General Illumination: Toward 200 Lm/W General Lighting LED Light Sources, In Eighth International Conference On Solid State Lighting, International Society for Optics and Photonics, (2008) 7058.

[11]Huang B.J., Tang C.W., Wu M.S., System Dynamics Model of High-Power LED Luminaire, Applied Thermal Engineering, 29(4) (2009) 609-616.

[12]Jang D., Yook S.J., Lee K.S., Optimum Design of a Radial Heat Sink with a Fin-Height Profile for High- Power LED Lighting Applications, Applied Energy, 116 (2014) 260-268.

[13]Schmid G., Valladares-Rendón L.G., Yang T.H., Chen, S.L., Numerical Analysis of the Effect of a Central Cylindrical Opening on the Heat Transfer of Radial Heat Sinks for Different Orientations, Applied Thermal Engineering, 125 (2017) 575-583.

[14]Shen Q., Sun D., Xu Y., Jin T., Zhao X., Orientation Effects on Natural Convection Heat Dissipation of Rectangular Fin Heat Sinks Mounted on Led's, International Journal of Heat and Mass Transfer, 75 (2014) 462-469.

[15]Yin L., Yang L., Yang W., Guo Y., Ma K., Li S., Zhang J., Thermal Design and Analysis of Multi-Chip LED Module with Ceramic Substrate, Solid-State Electronics, 54(12) (2010), 1520-1524.

[16]Ha M., Graham S., Development of a Thermal Resistance Model for Chip-On-Board Packaging of High Power LED Arrays, Microelectronics Reliability, 52(5) (2012) 836-844.

[17]Tang Y., Liu D., Yang H., Yang P., Thermal Effects on LED Lamp with Different Thermal Interface Materials, IEEE Transactions on Electron Devices, 63(12) (2016) 4819-4824.

[18]Abdelmlek K.B., Araoud Z., Ghay R., Abderrazak K., Charrada K., Zissis, G., Effect of Thermal Conduction Path Deficiency on Thermal Properties of Leds Package, Applied Thermal Engineering. 102 (2016) 251-260.

- [19] Moon S.H., Park Y.W., Yang H.M., A Single Unit Cooling Fins Aluminum Flat Heat Pipe for 100 W Socket Type COB LED Lamp, *Applied Thermal Engineering*, 126 (2016) 1164-1169.
- [20] Sosoi G., Vizitiu Ş.R., Burlacu A., Galatanu C.D., A Heat pipe Cooler for High Power LED's Cooling in Harsh Conditions, *Procedia Manufacturing*, 32 (2017) 513-519.
- [21] Joshi T., Parkash O., Krishan G., Numerical Investigation of Slurry Pressure Drop at Different Pipe Roughness in a Straight Pipe Using CFD, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47 (12) (2022), 15391-15414.
- [22] Çiftçi E., AlN/Saf Su Nanoakışkanının Isı Borusu Performans Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(4) (2020), 858-871.
- [23] Huang D.S., Chen T.C., Tsai L.T., Lin M.T., Design of Fins with a Grooved Heat Pipe for Dissipation of Heat from High Powered Automotive LED Headlights, *Energy Conversion and Management*, 180 (2019) 550–558.
- [24] Wang H., Qu J., Peng Y., Sun Q., Heat Transfer Performance of a Novel Tubular Oscillating Heat Pipe with Sintered Copper Particles Inside Flat-Plate Evaporator and High-Power LED Heat Sink Application, *Energy Conversion and Management*, 189 (2019) 215–222.
- [25] Lu X., Hua T-C., Wang Y.P., Thermal Analysis of High Power LED Package with HPHS, *Microelectronics Journal*, 42 (2011) 1257–1262.
- [26] Tang Y., Luo Y., Ou P., Wang H., Ma H., Qin Y., Bai P., Zhou G., Experimental Investigation on Active Heat Sink with Heat Pipe Assistance for High-Power Automotive LED Headlights, *Case Studies In Thermal Engineering*, 28 (2021) 101503.
- [27] Kline S.J., (1985), The Purposes of Uncertainty Analysis, *Journal of Fluids Engineerings*, 107, 153–160.
- [28] Moffat R.J, Describing the Uncertainties in Experimental Results, *Exp. Therm Fluid Sci.* 1 (1) (1988) 3–17
- [29] Fatchurrohman N., Chia S.T., Performance of Hybrid Nano-Micro Reinforced Mg Metal Matrix Composites Brake Calliper: Simulation Approach, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 257(1) (2017) 12060.
- [30] ANSYS FLUENT Theory Guide (Release 13.0), *Multiphase Flows*. ANSYS, Inc. (chapter 17), (2010) 455-568.
- [31] ANSYS FLUENT Theory Guide (Release 12.0), *Multiphase Flows*. ANSYS, Inc. (chapter 6.2.2), (2009).
- [32] De Schepper S.C., Heynderickx G.J., Marin G.B., Modeling the Evaporation of a Hydrocarbon Feedstock in the Convection Section of a Steam Cracker. *Computers & Chemical Engineering*, 33(1) (2009) 122-132.
- [33] Rammohan A., Chandramohan, V.P., Experimental Analysis on Estimating Junction Temperature and Service Life of High Power LED Array Microelectronics Reliability, 120 (2021) 114121.
- [34] DS115 LUXEON COB Core Range Product Datasheet, <https://www.lumileds.com/uploads/419/DS115-pdf>:
- [35] Zhang P., Zeng J., Chen X., Cai M., Xiao J., Yang D., An Experimental Investigation of a 100-W High-Power Light-Emitting Diode Array Using Vapor Chamber–Based Plate, *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11) (2015) 1687814015620074.
- [36] Lu X.Y., Hua T.C., Liu M. J., Cheng Y.X., Thermal Analysis of Loop Heat Pipe Used for High-Power LED., *Thermochimica Acta*, 493(1-2) (2009) 25-29.
- [37] Gwinn J.P., Webb R.L., Performance and Testing Of Thermal Interface Materials, *Microelectronics Journal*, 34 (3) (2003) 215-222.

The Synthesis of a Controlled Release System Based on MMT Added IPN Type Hydrogels

Evrım SEVER^{1*} , Mehlika PULAT² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 06500, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, 06500, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 14/08/2023
Revision: 31/08/2023
Accepted: 06/09/2023

Keywords

Hydrogel
Gelatin
MMT
Controlled Drug Release
Naproxen

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/08/2023
Düzeltilme: 31/08/2023
Kabul: 06/09/2023

Anahtar Kelimeler

Hidrojel
Jelatin
MMT
Kontrollü İlaç Salım
Naproksen

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The aim of this study is to develop a controlled Naproxen releasing system for anti-inflammatory treatments. Interpenetrating polymer network (IPN) type of hydrogels were synthesized by using alginate and gelatin. The effect of MMT in the IPN structure on Naproxen releasing was investigated. The release kinetics of Naproxen are match the Fickian diffusion. / Bu çalışmanın amacı, anti-inflamatuar tedaviler için kontrollü bir Naproksen salım sistemi geliştirmektir. Aljinat ve jelatin kullanılarak iç içe geçmiş polimer ağı (IPN) tipi hidrojeller sentezlenmiştir. IPN yapısındaki MMT'nin Naproksen salımına etkisi araştırılmıştır. Naproksen'in salım kinetiği Fickian difüzyonuyla eşleşmektedir.

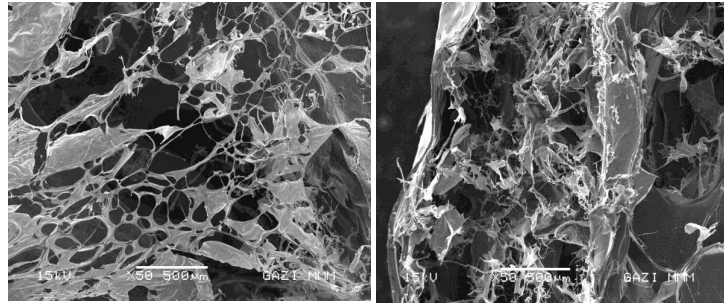


Figure A: SEM micrographs of (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips / Şekil A: (AG)₂ and (AG)₂-MMT hidrojellerine ait SEM mikrografları

Highlights (Önemli noktalar)

- In this study, a controlled Naproxen releasing system was developed for anti-inflammatory treatments. / Bu çalışmada anti-inflamatuar tedaviler için kontrollü Naproksen salım sistemi geliştirilmiştir.
- The hydrogel formation, swelling/degradation and releasing properties were investigated after the addition of MMT to the IPN structure. / MMT'nin IPN yapıya eklendikten sonra hidrojellerin oluşum, şişme/bozunma ve salım özelliklerine etkisi incelenmiştir.
- The swelling profiles of the hydrogels were compatible with their releasing behaviors. / Hidrojellerin şişme profilleri salım davranışlarıyla uyumludur.
- The release kinetics of Naproxen through the hydrogels are match the Fickian diffusion. / Hidrojellerden Naproksen salım kinetikleri Fickian difüzyonuyla eşleşmektedir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to release an anti-inflammatory drug from hydrogels synthesized using natural polymers and clay. / Bu çalışmanın amacı doğal polimerler ve kil kullanarak sentezlenen hidrojellerden anti-inflamatuar ilaç salımının sağlanmasıdır.

Originality (Özgünlük): The combination of natural polymers and clay has not been reported in the literature for naproxen release. / Naproksen salımını için literatürde doğal polimerler ve kil kombinasyonu rapor edilmemiştir.

Results (Bulgular): The results of swelling/degradation tests and SEM micrographs of the hydrogels are consistent with the release results. / Hidrojellerin şişme/bozunma testlerinin sonuçları ve SEM mikrografları salım sonuçlarıyla tutarlıdır.

Conclusion (Sonuç): Our study showed that these synthesized hydrogels including or not MMT can be promising candidate of drug delivery for Naproxen. / Çalışmamız, MMT içeren veya içermeyen bu sentezlenmiş hidrojellerin, Naproksen için umut vaat eden bir ilaç salım adayı olabileceğini gösterdi.



The Synthesis of a Controlled Release System Based on MMT Added IPN Type Hydrogels

Evrım SEVER^{1*} , Mehlika PULAT² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 06500, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, 06500, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 14/08/2023
Revision: 31/08/2023
Accepted: 06/09/2023

Keywords

Hydrogel
Gelatin
MMT
Controlled Drug Release
Naproxen

Abstract

The purpose of our study is to develop a controlled Naproxen releasing system for anti-inflammatory, analgesic treatments. Interpenetrating polymer network (IPN) type of hydrogels were obtained by using natural polymers alginate and gelatin. The hydrogels were prepared by combining alginate and gelatin in the presence of glutaraldehyde as crosslinker of gelatin. Montmorillonite (MMT) clay was used as a nano-dimensioned and layered dopant. The prepared hydrogels were characterized via hydrogel formation, swelling/degradation measurements, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), and Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. Swelling tests presented that the presence of MMT in the polymer network decreases the swelling. From the SEM micrographs, it can be seen that MMT added hydrogel has smaller and more pore than the other. The release studies of Naproxen were maintained in Britton-Robinson Buffer (BRB) solution (pH=7.4) and at 37°C. It is observed that the swelling profiles of the hydrogels were compatible with the releasing behaviors. The release kinetics of Naproxen are match the Fickian diffusion.

MMT Katkılı IPN Tipi Hidrojel Temelli Kontrollü Salım Sisteminin Sentezi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/08/2023
Düzeltilme: 31/08/2023
Kabul: 06/09/2023

Anahtar Kelimeler

Hidrojel
Jelatin
MMT
Kontrollü İlaç Salım
Naproxen

Öz

Çalışmamızın amacı antiinflatuar, analjezik tedaviler için kontrollü bir Naproksen salım sistemi geliştirmektir. İç içe geçmiş polimer ağı (IPN) tipi hidrojel, doğal polimerler aljinat ve jelatin kullanılarak elde edildi. Hidrojeller, aljinat ve jelatinin, jelatinin çapraz bağlayıcısı olarak glutaraldehit varlığında birleştirilmesiyle hazırlandı. Nano boyutlu ve katmanlı katkı maddesi olarak Montmorillonit (MMT) kili kullanıldı. Hazırlanan hidrojel, hidrojel oluşumu, şişme/bozulma ölçümleri, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ile karakterize edildi. Şişme testleri, polimer ağındaki MMT varlığının şişmeyi azalttığını ortaya koydu. SEM mikrograflarından MMT katkılı hidrojin diğerine göre daha küçük ve daha fazla gözeneklere sahip olduğu görülmektedir. Naproksen'in salım çalışmaları Britton-Robinson Tampon (BRB) çözeltisinde (pH=7,4) ve 37°C'de sürdürüldü. Hidrojellerin şişme profillerinin salım davranışlarıyla uyumlu olduğu gözlemlendi. Naproksen'in salım kinetiği Fickian difüzyonuyla eşleşmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Hydrogels are composed of three dimensionally crosslinked of hydrophilic polymer networks that have capable of absorption of liquids. The amount of water that they able to absorb is between 10 and 1000 times than their own dry weight. In addition, the swelling capacities are affected by their content, composition ratio, temperature, pH or nature of solutions etc. They can compose by interpenetrating of at least two polymers in the presence of

crosslinkers. These polymers can be from natural or synthetic origin and crosslinked by chemically, physically or enzymatically [1]. Interpenetrating polymer networks (IPN) are called semi-IPN when one of the polymers in network is crosslinked. If both polymers are crosslinked, they called full-IPN. The combination of polymers that have different properties in one network provides advantages to usage in wide range of areas such as food industry, water purification and dye removing, cosmetics,

agriculture and biomedical applications (biosensors, pharmaceuticals, drug delivery) [2].

Controlled release phenomenon aims to distribute an active agent at a certain rate and time. This release is regulated by diffusion, erosion, swelling, magnetic and mechanically controlled release systems. Hydrogel forms such as matrix, encapsulation or ink are used as a controlled release material nowadays. Pore sizes and hydrophilicity of hydrogels are the major parameters in order to control of releasing system. Therefore, nature of polymers, crosslinking process, thermal or pH dependent properties arrange the releasing [3]. The natural polymers are quietly advantageous materials for controlled release systems.

Alginate is a linear polysaccharide that is commonly used due to the ability of water absorption. Besides its superior properties such as biodegradable, biocompatible and non-toxic nature, it has low bioadhesivity and inertness. However, when the weak properties of alginate are enhanced by combining them with other materials, there are areas of use in pharmaceuticals, wound healing, drug delivery system, cell therapy [4].

Gelatin is a type of protein obtained by hydrolysis of collagen. It is a natural polymer with a high charge density including amino, hydroxyl, and carboxyl groups. Its biodegradability, water absorption capacity and low cost make it a preferred choice to bioengineering and food industry [5].

The use of clays in controlled drug release systems have a great attention with the back to nature. The clays have advantages such as their high surface area, cation exchange capacity, microporosity, and strong hydrogen bond interactions. MMT belongs to smectite clay group. The smectite clay is a layered aluminosilicates that composed of 2:1 ratio of two tetrahedral sheets of $[\text{SiO}_4]^{4-}$ and one octahedral sheet of $[\text{AlO}_3(\text{OH})_3]^{6-}$. Molecules or cations can intercalate into the interlayer space of the (001) plane of MMT. Thus, the space of interlayer in MMT can arrange the hydrophilicity of the structure it is in. Its combination with polymer networks becomes biodegradable, biocompatible nanocomposites [6,7].

In this study, we reported a combining of the natural amphoteric gelatin and anionic alginate polymers and MMT clay. The effect of MMT on swelling/degradation properties of the hydrogels were examined. Naproxen is well known non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) that have effect of anti-inflammatory treatment. The

controlled release of Naproxen was performed through the hydrogels and determined the release kinetic parameters.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1. Experimental Equipment (Deneysel Ekipman)

Sodium alginate, gelatin (powder), ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), glutaraldehyde (25% aqueous solution), CaCl_2 , montmorillonite and Naproxen were provided from Sigma-Aldrich. The Britton-Robinson Buffer (BRB) solution was prepared as in the literature [8]. The mixture of H_3BO_3 (Merck), H_3PO_4 and CH_3COOH (Sigma-Aldrich) solutions has been titrated to targeted pH with 0.2 M NaOH.

2.2. 'One Pot Method' Preparation of the IPN Type Hydrogels (Deney Tasarımı)

In order to obtain the IPN type hydrogels, alginate solution (5%) and gelatin solution (10%) were prepared, separately. The alginate and gelatin solutions were mixed at 1:3, 1:1 and 3:1 ratios, respectively and stirred until they were dispersed in each other. Glutaraldehyde, as crosslinker of gelatin, was added the homogenous solutions. Then mixtures were poured to mold rapidly. The mold was allowed to stand at 37°C for 1h to curing. This process provides the formation and crosslinking of hydrogel physically and chemically. When gelation was completed, obtained hydrogels were sliced and washed distilled water to remove unreacted components. Semi-IPN type hydrogels that obtained by crosslinking of one of the polymers were kept at room temperature, then dried at 37°C until reach to the constant weight. They were named as $(\text{AG})_1$, $(\text{AG})_2$ and $(\text{AG})_3$ hydrogel strips, respectively by ratios.

In the synthesis of MMT clay added (AG) hydrogels, MMT was included at the mixing stage of the polymer solutions. After the MMT was well dispersed in the mixture, glutaraldehyde was added and the mixture was poured to mold rapidly. The obtained MMT added semi-IPN hydrogels were dried in the same way and names as $(\text{AG})_1$ -MMT, $(\text{AG})_2$ -MMT and $(\text{AG})_3$ -MMT hydrogel strips. The predetermined amounts of all reactants are given in Table 1.

2.3. Characterization (Karakterizasyon)

Yield of Hydrogel Formation (Hidrojel Oluşum Verimi)

Yields of hydrogel formation (HF) of the strips were gravimetrically calculated. The obtained hydrogel strips were dried until reach to the constant weight. Then they were kept in water bath for 48h to remove unreacted or excessive components. After the washed hydrogel strips were taken from the bath,

they were dried at room temperature, then at 37°C and weighed again. In order to determine of HF, below formula was followed:

$$HF (\%) = \frac{m}{m_0} \quad (1)$$

where m_0 and m are the weight of dried hydrogel strips before and after washing, respectively. All measurements were carried out in triplicate.

Table 1. Amount of the reactants used to synthesize the hydrogel strips and yield of HF (Hidrojel şeritlerin sentezi için kullanılan reaktantların miktarı ve hidrojel oluşumu (%))

Hydrogel	Alginate (5%), mL	Gelatin (10%), mL	MMT (w/w) (%)	Hydrogel Formation (%)
(AG) ₁	20	60	-	85.2
(AG) ₂	40	40	-	90.5
(AG) ₃	60	20	-	95.8
(AG) ₁ -MMT	20	60	1.0	88.2
(AG) ₂ -MMT	20	20	1.0	92.9
(AG) ₃ -MMT	60	20	1.0	97.5

*3.0 mL of Glutaraldehyde (25%, v/v) was used in each syntheses.

FT-IR Measurements (FT-IR Ölçümleri)

FT-IR spectra of the hydrogel strips and MMT were determined by Thermo Scientific Nicolet İS5 spectrometer. The spectra were obtained at a resolution of 4 cm⁻¹ after 128 scans.

Swelling Tests (Şişme Testleri)

Swelling tests of the hydrogels were gravimetrically performed at three stages. At the first stage, dry samples were placed to swell in BRB solution (pH=7.4) at 37°C. Swollen hydrogels were taken from the BRB, weighed at certain intervals and then placed into the bath again. Equation (2) was used for all calculations of swelling rates (S%):

$$S(\%) = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (2)$$

where M_w and M_d is the hydrated (swollen) and the dehydrated (dry) weight of the hydrogel strips. Time dependence swelling rates were continued for 24 hours until reach constant weight for each samples.

In the second stage, temperature dependence of swelling rates at different temperatures between 4°C and 60°C was carried out. The swelling tests were performed in the same way above mentioned for 24h.

In the third stage, pH dependence of swelling profiles of the hydrogels was investigated. The dried samples were allowed to swell at 37°C for 24 hours at various pH ranges from 2 to 12.

Degradation Tests (Bozunma Testleri)

The hydrogels dried to constant weight were put to swell in BRB buffer (pH=7.4) at 37°C. The swollen strips were taken from the BRB solution end of the 24h. This weight of most swollen state of strips was noted as M_m . After that the hydrogels were put into the BRB solution again and weighed at determined intervals for 30 days. Degradation rates (%) were calculated by the Equation (3):

$$\text{Degradation } (\%) = \frac{M_m - M_t}{M_m} \times 100 \quad (3)$$

where M_m and M_t is the weight of hydrogels at the maximum swollen state and at the time t , respectively. All experiments were performed in three times.

SEM Observations (SEM Gözlemleri)

Firstly, the hydrogels were allowed to swell to equilibrium in BRB solution at 37°C and then they were put in a deep freezer at -20°C for 24 h and then replaced into a freeze dryer at -85°C for 24 h (Christ-Alfa 2-4 Model, Martin Christ GmbH). They were coated with 200 Å Au. The surface morphology of the hydrogel strips was observed via SEM (JEOL JSM 6060 LV).

Drug Loading and Release Studies (İlaç Yükleme ve Salım Çalışmaları)

Naproxen loaded IPN hydrogel strips were obtained by directly adding Naproxen (10 mg per strip) at the stage of mixing of polymer solutions. Likewise, hydrogel preparing process as mentioned above, the wet hydrogel strips were taken from the molds and drug loaded hydrogels were dried at room temperature, then at 37°C.

The release studies of Naproxen from the hydrogel strips were investigated in 100 mL of BRB solution by a spectrophotometer (Unicam UV-2100 Haverhill, MA). The specific wavelength of the drug was determined at $\lambda_{max} = 260$ nm. Aliquots of 0.5 mL were drawn from the BRB solution at various time intervals such as 60, 120, 180, 240 and 300 minutes and added with an equivalent volume of BRB. Thus, sink conditions were provided during the drug release [9]. All measurements were repeated in triplicate. The percentage of cumulative drug release was calculated by the Equation (4):

$$\text{Cumulative Release (\%)} = \frac{W_t}{W_{total}} \times 100 \quad (4)$$

where W_t and W_{total} is the weight of the released drug at any time and the initial total weight of Naproxen loaded into the matrix of hydrogel strips, respectively.

3. RESULTS (BULGULAR)

Hydrogel Formation (Hidrojel Oluşumu)

A series of (AG) hydrogel strips prepared by combining two natural polymers to provide controlled release of naproxen. The properties of the hydrogels like durability after swelling and yields of hydrogel formation were evaluated. In this study, we aimed to form semi-IPN hydrogels between

alginate and gelatin. Thus, while alginate provided strength to the hydrogel structure, gelatin contributed to the swelling values and flexibility of the network structure. The (AG)₁ hydrogel had very tight matrix due to the ratio of alginate volume in mixture (3:1) therefore the swelling values of this hydrogel was the lowest. Since the (AG)₃ hydrogel structure contained three times more gelatin volume (1:3), it maximized the swelling values. Unfortunately, it was not suitable for controlled release because of very loose matrix. For this reason, we choose (AG)₂ hydrogel among the (AG) hydrogel strips and prepared MMT added (AG)₂ hydrogel strips.

FT-IR Measurements (FT-IR Ölçümleri)

The FT-IR spectra of MMT clay, alginate and gelatin hydrogels, the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips are given in Figure 1. The curve given at Figure 1 (a) shows the three peaks belongs to MMT clay that indicate Al-OH stretching at 3624 cm⁻¹, deformation vibration of the hydroxyl groups at 1636 cm⁻¹ and Si-O stretching vibration at 1013 cm⁻¹ [10]. The bands at 1632 cm⁻¹, 1533 cm⁻¹ and 1234 cm⁻¹ indicates the amide I, II and III bands of gelatin at Figure 1 (d). In addition, at the curve (d), the broad peak at 3291 cm⁻¹, 3074 cm⁻¹, 2935 cm⁻¹ and 1446 cm⁻¹ indicates to N-H stretching, aliphatic C-H stretching and bending vibrations, respectively [11]. At the curve in Figure 1 (e), a broad peak at 3368 cm⁻¹ is assigned to the stretching vibration of hydroxyl groups of alginate hydrogel. Additionally, the peaks at 1619 cm⁻¹ and 1429 cm⁻¹ are belong to asymmetric and symmetric carboxyl groups, at 1016 cm⁻¹ is attributed to cyclic ether bridge of Alginate [12]. It is observed the specific peaks at 822 cm⁻¹ and 942 cm⁻¹ indicate Gluronic (G) and Manuronic (M) acid functional groups of alginate.

In general, the characteristic peaks of gelatin were obviously observed both curves of the hydrogel strips that given at Figure 1 (b) and (c). It can be interpreted, as the amount of gelatin in polymeric mixture are high, the character of gelatin is dominant in hydrogel strips. The difference between the curves of (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogels is the peak intensity at 1028 cm⁻¹. The intensity of peak at 1028 cm⁻¹ is higher in the curve of X (c) belongs to MMT added (AG)₂ hydrogel strip. The difference is originated from the MMT clay in the matrix of (AG)₂-MMT hydrogel.

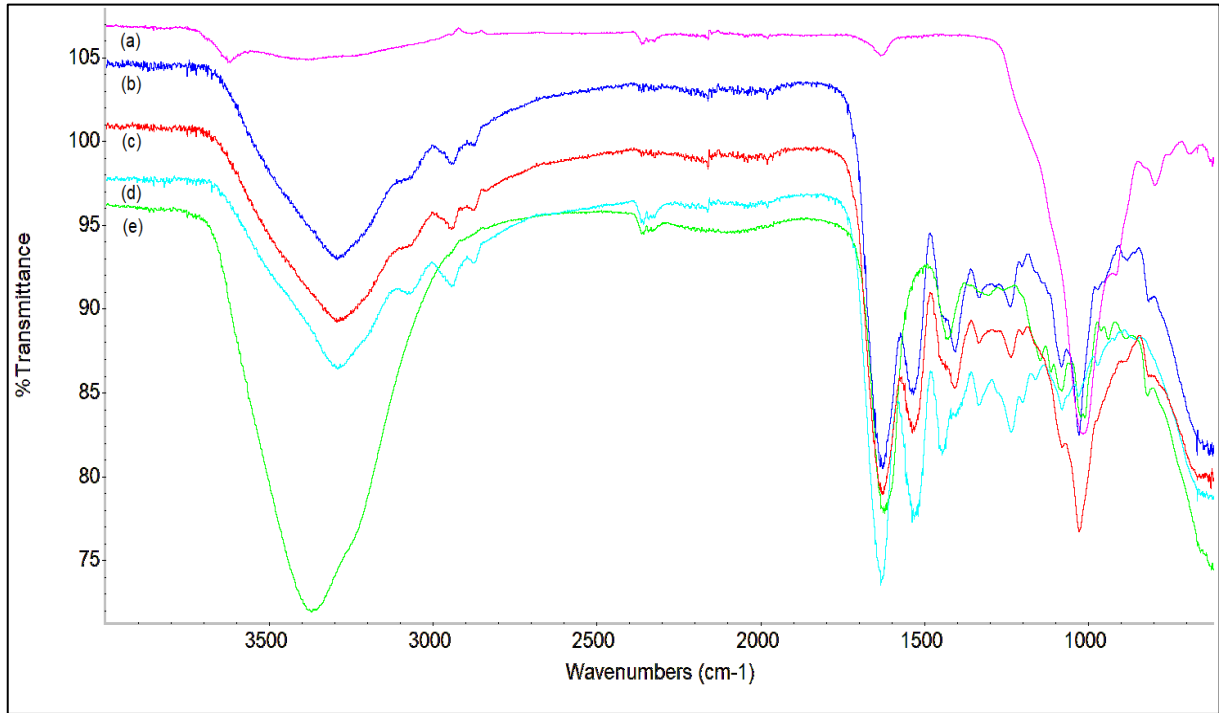


Figure 1. FTIR spectrum of a) MMT clay, b) (AG)₂, c) (AG)₂-MMT, d) gelatin and e) alginate hydrogels ((a) MMT kili, b) (AG)₂, c) (AG)₂-MMT, d) jelatin ve e) aljinat) hidrojellerin FT-IR spektrumları)

Swelling Behaviors of the Hydrogels (Hidrojellerin Şişme Davranışları)

Figure 2 shows the changing of swelling values with time at pH=7.4 and 37°C. Swelling values increased at first and then stabilized after 12 h. While alginate and gelatin hydrogels had low swelling percentages, (AG) series that combining of them with different ratio had higher swelling values. When preparing the (AG) hydrogels, the glutaraldehyde that gelatin crosslinker was only used. Alginate chains, which are free in the semi-IPN hydrogel matrix, prevent the crosslinking of gelatin chains. Thus, swelling

values are higher than alginate and gelatin hydrogels. It is observed that from the Figure 2 as the gelatin ratio in the hydrogel matrix was increase, the swelling values increase.

As can be seen from Figure 3, MMT added homopolymer alginate and gelatin hydrogels (A-MMT and G-MMT) and hybrid (AG)₂ hydrogel has lower swelling values than without MMT added hydrogels that presented in Figure 2. It can be interpreted that MMT acted as a crosslinker in the polymer matrix and enabled semi-IPN hydrogels to be full-IPN.

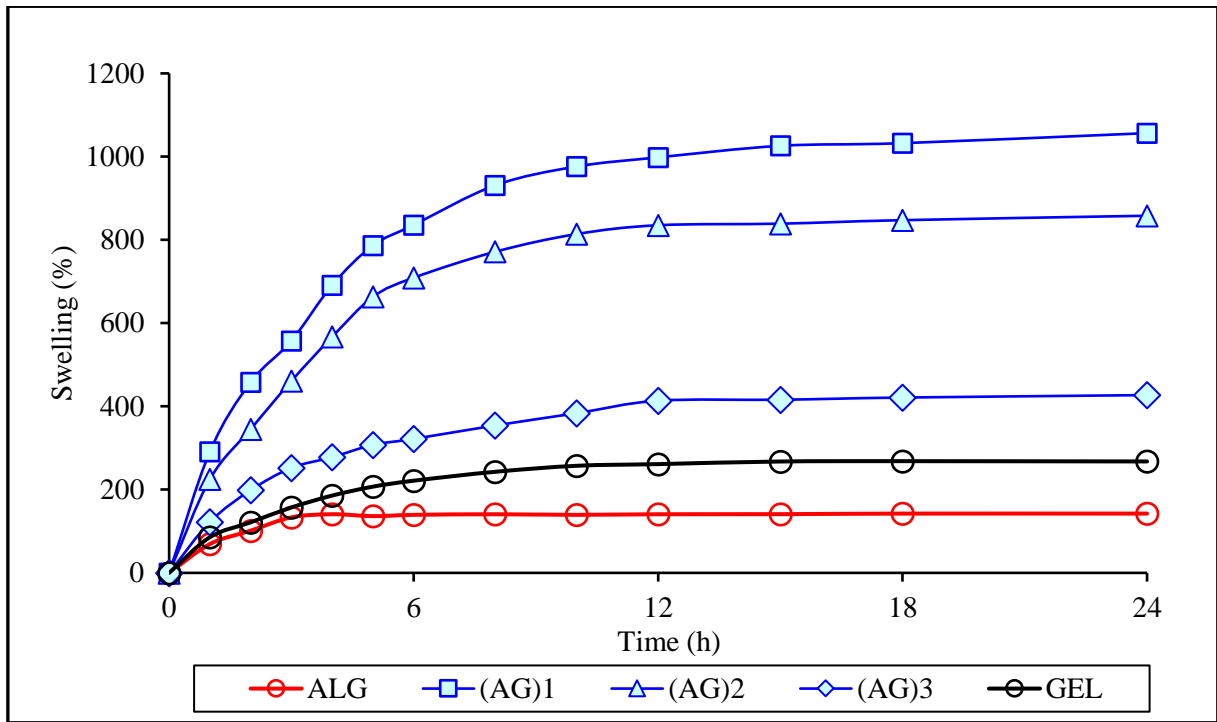


Figure 2. The change of S% with time for the hydrogel strips (Hidrojel şeritlerin şişme değerlerinin zamanla değişimi)

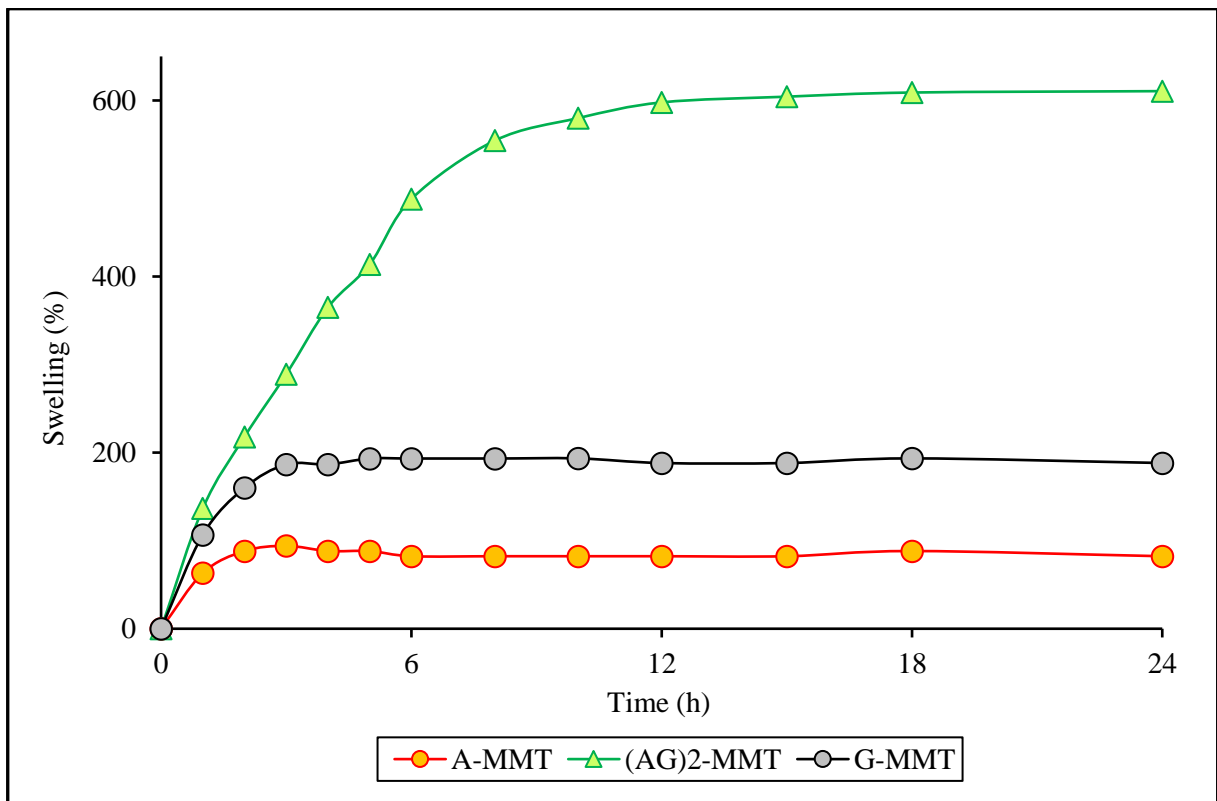


Figure 3. The change of S% with time for the MMT added hydrogel strips (MMT katkılı hidrojel şeritlerin şişme değerlerinin zamanla değişimi)

Figure 4 shows the change of swelling with temperature at pH=7.4 for 24 h. We can say that the hydrogel strips were not affected by the changes of temperature. The temperature dependent swelling

values of the hydrogels are very close to time dependent swelling values. Compared to (AG) and (AG)₂-MMT, the swelling value of the MMT added hydrogel strip have almost no fluctuations. It is

stated that MMT nanosheets contributes to composites that containing gelatin by its own superior thermal properties [13].

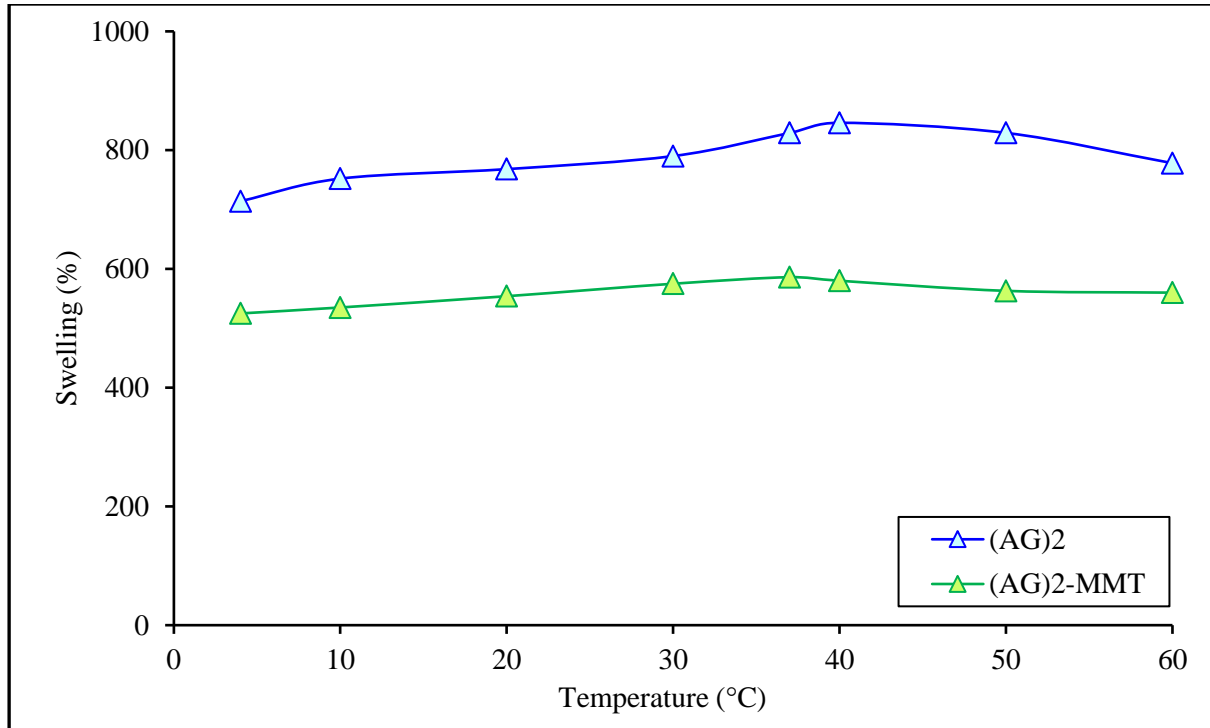


Figure 4. The change of S% with temperature for the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips ((AG)₂ and (AG)₂-MMT hidrojel şeritlerinin şişme değerlerinin sıcaklıkla değişimi)

The changes of swelling values with pH at 37°C for 24 hours is presented in Figure 5. (AG)₂ hydrogel strips contain free anionic alginate and crosslinked amphoteric gelatin chains. The anionic carboxylate ends of alginate (-COO⁻) and the amine ends of gelatin (-NH₂) are converted to neutral carboxylic acid groups (-COOH) and ammonium (-NH₃⁺) at acidic pH values. This prevents the polymer network to swelling at these pH values. The carboxylate groups are dominant in swelling at alkaline pH values and the swelling is affected

positively. The isoelectric point (pI) value of gelatin is between 4.68–5.26 [14]. The ionization of carboxylic acid and amine groups is equal in amino acid structures such as gelatin at the pI. Therefore, swelling is minimum. It can be said that the increase in swelling values between pH from 4 to 8 and being the maximum swelling are due to the carboxylate groups belonging to the free alginate chains in the matrix. This can be interpreted as anionic alginate dominating the amphoteric gelatin in the hydrogel structure.

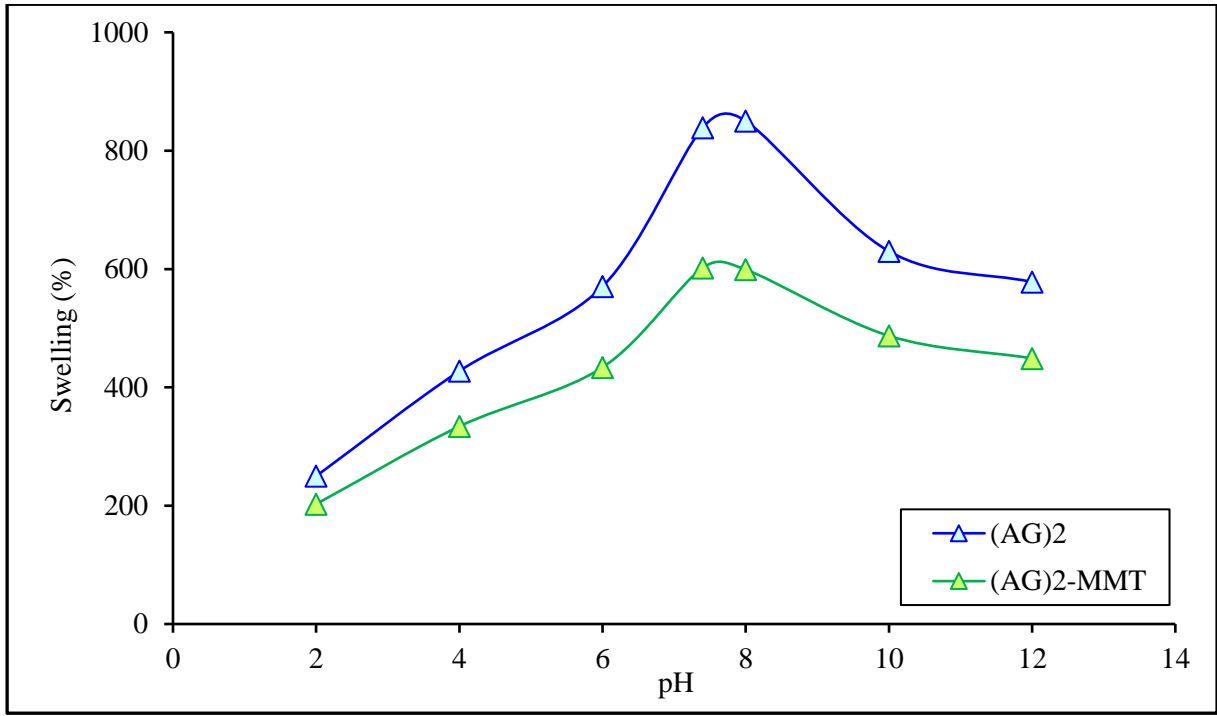


Figure 5. The change of S% with pH for the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips ((AG)₂ and (AG)₂-MMT hidrojel şeritlerinin şişme değerlerinin pH ile değişimi)

Degradation Behaviors of the Hydrogels (Hidrojellerin Bozunma Davranışları)

The degradation of hydrogel strips was investigated in BRB solution for 30 days. The rates of degradation were calculated by the Equation (3) and the degradation profiles were presented gravimetrically in Figure 6. It is observed that the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips have lost nearly 50% and 30%, respectively. Overall, the hydrogels exhibited a slight degradation profile.

While gelatin chains are crosslinked in the (AG)₂ hydrogel matrix, the alginate chains are in free form. Considering the time dependent swelling values, as the hydrogel structure swells, uncrosslinked gelatin and free alginate chains may be removed from the matrix. This situation is limited by the presence of MMT in the structure and can be interpreted as providing strength to the structure due to hydrogen bond interactions and intercalation properties of MMT.

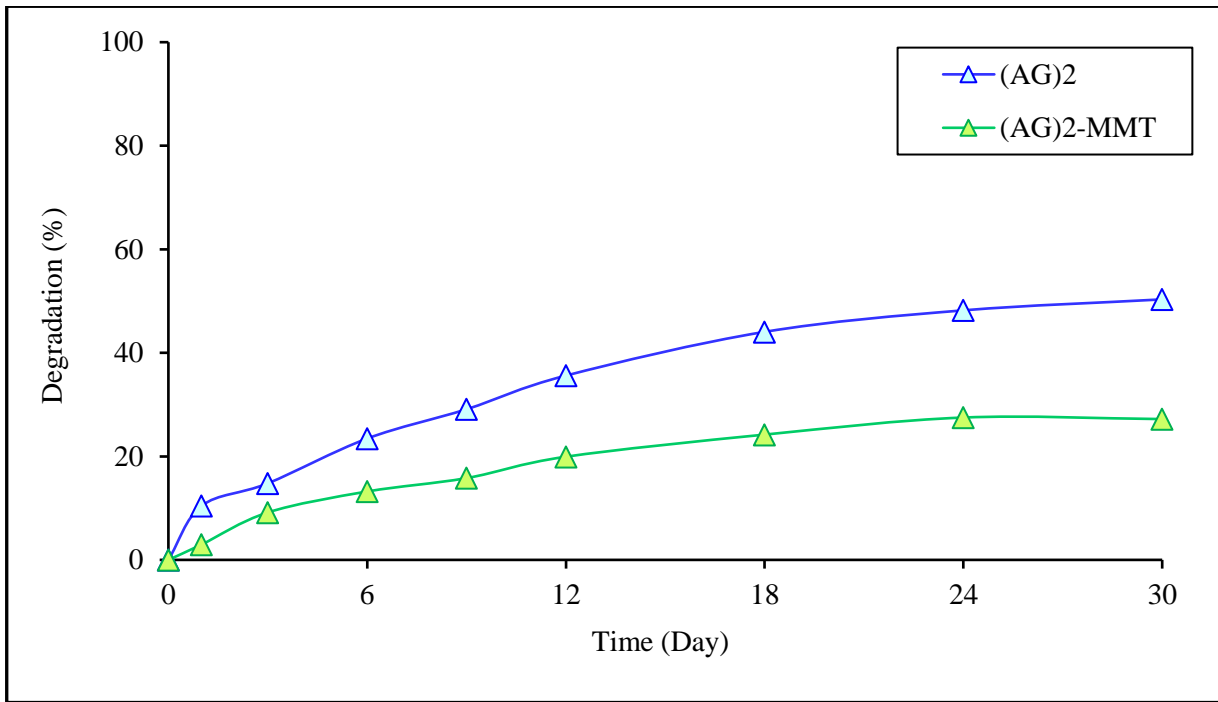


Figure 6. The degradation profiles of the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips (t=37°C and pH=7.4) ((AG)₂ and (AG)₂-MMT hidrojel şeritlerinin bozunma profilleri)

SEM Observations (SEM Gözlemleri)

The morphologies of (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips were observed through a scanning electron microscope and SEM micrographs were presented in Figure 7. SEM results showed porosity of the hydrogels. These porous structures enable the water absorption. The absorbed water inside the matrix interacts with hydrophilic groups and this

promote the swelling and hence drug releasing [15]. As can be seen that from the micrograph (b), the presence of MMT in the hydrogel matrix caused an effect of second crosslinker. The structure of (AG)₂-MMT strip have smaller pores. Similar SEM results in the literature confirm the effect of MMT to the pores in the hydrogel matrix [6]. So, it can be said that MMT added hydrogel became a full-IPN type hydrogel.

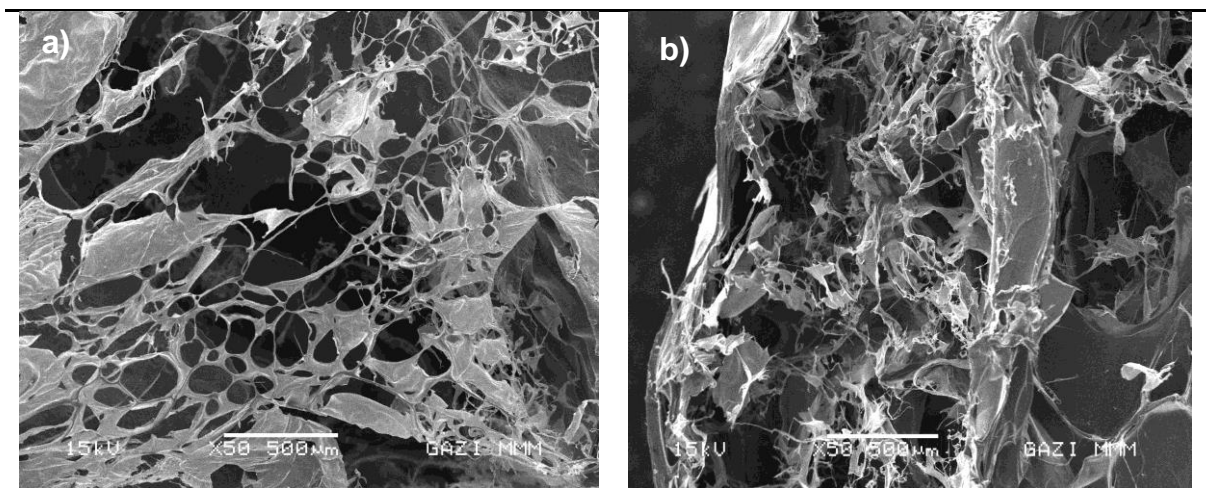


Figure 7. SEM micrographs of the hydrogel strips a) (AG)₂ (x50) and b) (AG)₂-MMT (x50) ((a) (AG)₂ (x50) ve b) (AG)₂-MMT (x50) hidrojel şeritlerinin SEM mikrografları)

Drug Release Kinetics (İlaç Salım Kinetikleri)

The cumulative release profiles of Naproxen through (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips were presented in Figure 8. As can be seen from the figure, the values of Naproxen release are 61% and 47% for (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips, respectively. The half of all releasing amount were nearly released at the first 6 hours. The rates of release decreased after the first 12 hours and remained stable in 24 hours for both. In the literature, the therapeutic range of Naproxen has been reported as 3-9 µg/mL [16]. At the end of 48h, the release of Naproxen from the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips had reached 0,88 and 0,68 µg/mL, respectively. At the stage of the synthesis, 10 mg of Naproxen had loaded to hydrogel mixture. So, if the amount of Naproxen to load is increase, it

can be reach at requested period according to the amount and usage [17].

The (AG)₂ hydrogel strip has higher release values than the (AG)₂-MMT hydrogel as it has larger pores in its matrix as seen from the SEM micrographs. As mentioned above, MMT makes a secondary crosslinker effect through hydrogen bond interactions within the polymer matrix. Hence, MMT added (AG)₂ hydrogel strips have lower swelling and drug releasing values as have tighter matrix. Also, the releasing profiles of the hydrogels were accord with their swelling behaviors because the swelling parameters directly affect the release behaviors. Similar results have been reported on drug release from MMT added alginate composite beads [18].

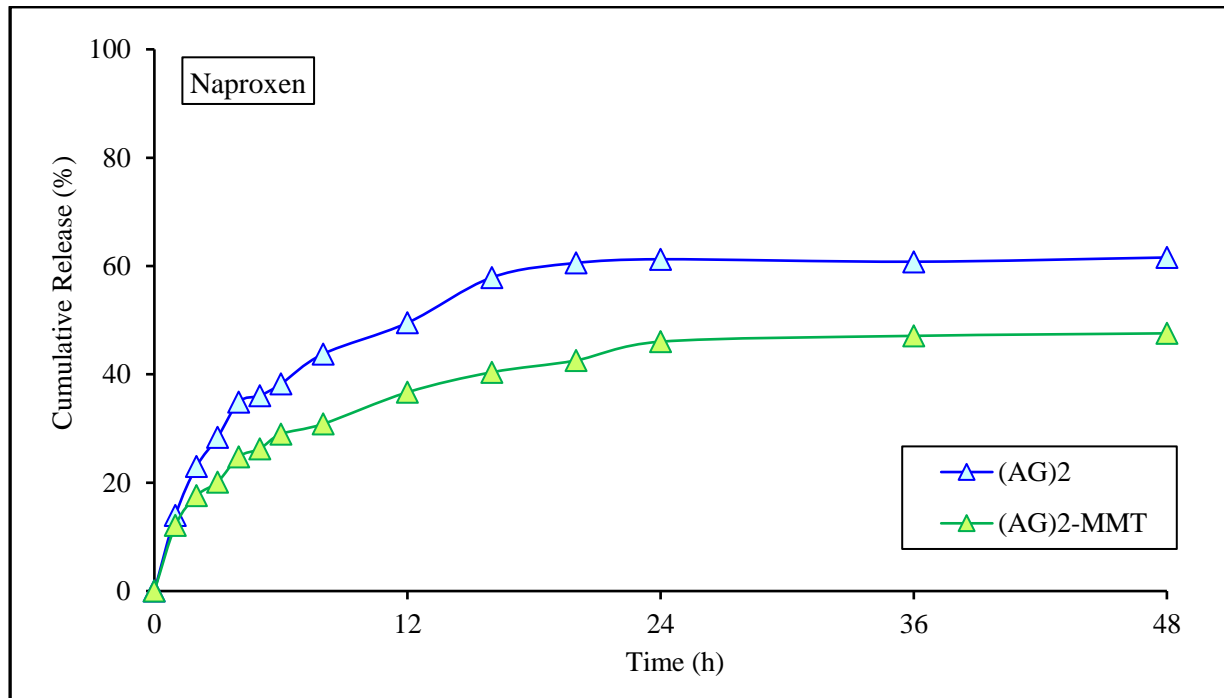


Figure 8. Release profile of Naproxen from the (AG)₂ and (AG)₂-MMT hydrogel strips strips ((AG)₂ and (AG)₂-MMT hidrojel şeritlerinden Naproksen salım profili)

The releasing data of the hydrogels was calculated by different empirical kinetic models to determine the kinetics related to diffusion type of system. The fitted results that given in Figure 9 were matched the Peppas model. Equation (5) given below was used to express drug release parameters [32]:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k \cdot t^n \quad (5)$$

M_t : is the cumulative release at time t ,
 M_∞ : the maximum cumulative released drug,
 k : a characteristic constant correlated to the structure of the matrix,
 n : the diffusional exponent characteristic of the release mechanism.

The n and k values of (AG)₂ and (AG)₂-MMT were defined by Equation (5) and presented in Table 2. When $n < 0.45$, the drug release mechanism is

Fickian diffusion; when $0.45 < n < 0.89$, it is non-Fickian diffusion, and when $n > 0.89$ Case II or Super Case II mechanism. The characteristic parameter n indicates that the release mechanism of Naproxen from $(AG)_2$ and $(AG)_2$ -MMT hydrogel strips is

Fickian diffusion (R^2 : 0.9936 and R^2 : 0.9951, respectively). In summary, the hydrogels prepared in our study can accomplish treatment of Naproxen by controlled release of drugs.

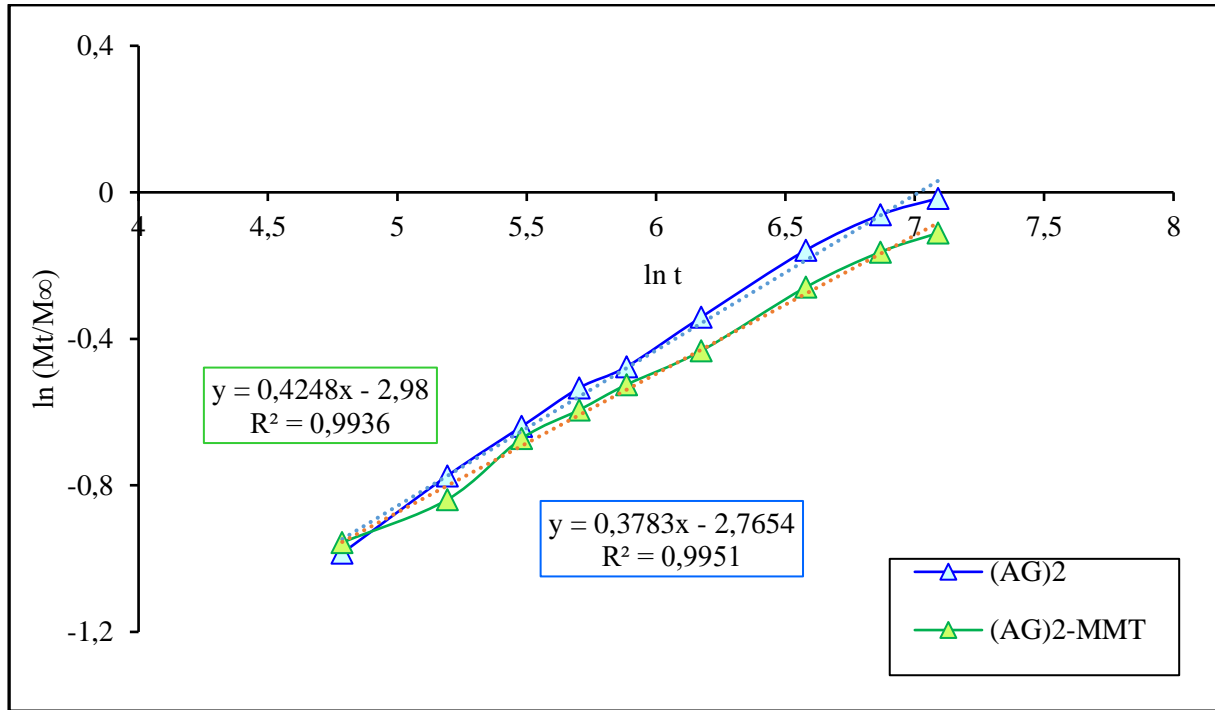


Figure 9. Release kinetics of Naproxen from the $(AG)_2$ and $(AG)_2$ -MMT hydrogel strips (($AG)_2$ and $(AG)_2$ -MMT hidrojel şeritlerinden Naproksen salım kinetikleri)

Table 2. Release parameters of drug through the hydrogel strips (R^2 : Deterministic coefficient) (Hidrojel şeritlerden ilaç salım parametreleri)

Hydrogels	Release of Naproxen		
	n	k	R^2
$(AG)_2$	0.42	5.08×10^{-2}	0.9936
$(AG)_2$ -MMT	0.37	6.29×10^{-2}	0.9951

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Synthesis and characterization of a series hydrogels that combining natural alginate and gelatin polymers with MMT clay was presented in this paper. Based on swelling values of the hydrogel, the proper hydrogel $(AG)_2$ to releasing studies was selected. MMT added $(AG)_2$ hydrogel strips were synthesized and determined the swelling/degradation properties for all hydrogels. The hydrogels were evaluated by the data from the results of HF, swelling and degradation and characterized by SEM and FT-IR. Then the

controlled release studies were carried out. Naproxen that has an anti-inflammatory effect was used for the controlled release. It is found that the release mechanism of the hydrogels suited Peppas model. This mechanism and SEM micrographs confirmed the effect of MMT in the matrix on porous structure and releasing. The amount of Naproxen cumulative release of $(AG)_2$ and $(AG)_2$ -MMT hydrogels are 61% and 47%, respectively. Our study showed that these synthesized hydrogels including or not MMT can be promising candidate of drug delivery for Naproxen.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported with the project number FDK-6920 under the program of Gazi University Scientific Research Project Unit.

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)

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

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

Mehlika PULAT: She contributed with her knowledge and experience at every stage of the study.

Çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlamıştır.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ahmed E. M., Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review, *Journal of Advanced Research*, 6 (2015) 105–121.
- [2] Varaprasad K., Raghavendra G. M., Jayaramudu T., Yallapu M. M., Sadiku R., A mini review on hydrogels classification and recent developments in miscellaneous applications, *Material Science and Engineering C*, 79 (2017) 958–971.
- [3] Lin C.C., Metters A.T., Hydrogels in controlled release formulations: network design and mathematical modeling, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 58(12-13) (2006) 1379-1408.
- [4] Aljohani W. J., Wenchao L., Ullah M. W., Zhang X., Yang G., Application of sodium alginate hydrogel, *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 3 (2017) 19-31.
- [5] Ye J., Yang G., Zhang J., Xiao Z., He L., Zhang H., Liu Q., Preparation and characterization of gelatin-polysaccharide composite hydrogels for tissue engineering, *Peer J.*, (2021) 11022.
- [6] Kevadiya B. D., Patel H. A., Joshi G. V., Abdi S. H. R., Bajaj H. C., Montmorillonite-Alginate Composites as a Drug Delivery System: Intercalation and In vitro Release of Diclofenac sodium, *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 72 (6) (2010) 732-737.
- [7] Akin K., Ugraskan V., Isık B., Cakar F., Adsorptive removal of crystal violet from wastewater using sodium alginate-gelatin-montmorillonite ternary composite microbeads, *International Journal of Biological Macromolecules*, 223 (2022) 543–554.
- [8] Pulat M., Asıl D., Fluconazole release through semi-interpenetrating polymer network hydrogels based on chitosan, acrylic acid, and citraconic acid, *Journal of Applied Polymer Science*, 113 (2009) 2613–2619.
- [9] Song S.Z., Cardinal J.R., Kim S.H., Kim S.W., Progesterin Permeation Through Polymer Membranes V: Progesterone Release from Monolithic Hydrogel Devices, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 70 (2) (1981) 216-219.
- [10] Xu S. W., Zheng J. P., Tong L., Yao K. D., Interaction of Functional Groups of Gelatin and Montmorillonite in Nanocomposite, *Journal of Applied Polymer Science*, 101 (2006) 1556–1561.
- [11] Kim S., Kang Y., Krueger C. A., Sen M., Holcomb J. B., Chen D., Wenke J. C., Yang Y., Sequential delivery of BMP-2 and IGF-1 using a chitosan gel with gelatin microspheres enhances early osteoblastic differentiation, *Acta Biomaterialia*, 8 (2012) 1768-1777.
- [12] Dai Y. N., Li P., Zhang J. P., Wang A. Q., Wei Q., A Novel pH Sensitive N-Succinyl Chitosan/Alginate Hydrogel Bead for Nifedipine Delivery, *Biopharmaceutics and Drug Disposition*, 29 (2008) 173-184.

- [13] Zheng J. P., Li P., Ma Y. L., Yao K. D., Gelatin/Montmorillonite Hybrid Nanocomposite. I. Preparation and Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 86 (2002) 1189–1194.
- [14] Johlin J.M., The Isoelectric Point of Gelatin and Its Relation to the Minimum Physical Properties of Gelatin, *Journal of Biological Chemistry*, 86 (1) (1930) 231-243.
- [15] Kenawy E.R., Azaam M. M., El-nshar EM., Sodium alginate-g-poly (acrylic acid-co-2-hydroxyethyl methacrylate)/ montmorillonite superabsorbent composite: Preparation, swelling investigation and its application as a slow-release fertilizer, *Arabian Journal of Chemistry*, 12(6) (2019) 847-856.
- [16] Paulus H.E., Furst D.E., Dromgoole S.H., *Drugs for Rheumatic Disease*, Churchill Livingstone (1987).
- [17] Razzaq A., Qureshi İ. Z., Naproxen sodium nanoparticles are less toxic and gastroprotective agents than the conventional NSAID drug naproxen sodium in Balb/c mice, *Toxicology and Applied Pharmacology*, 452 (2022) 116192.
- [18] Shabanpour S., Shariati F. P., Khatibani A. B., Potential Alendronate Sodium drug carrier by preparation and characterization of sodium alginate cross-linked Montmorillonite, *Brazillian Journal of Pharmaceutical Science*, 58 (2022) e20243.

Taguchi Based Gray Relational Analysis of Production Parameters of Al7075/B₄C/GNPs Hybrid Composites

Onur ALTUNTAŞ^{1*} 

¹Department of Warfare Weapons and Tools, Alparslan Defense Sciences and National Security Institute, National Defense University, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 23/08/2023
Revision: 06/09/2023
Accepted: 11/09/2023

Keywords

Hybrid Composite
Powder Metallurgy
Graphene Nanoplatelets
Gray Relational Analysis
Taguchi

Makale Bilgisi

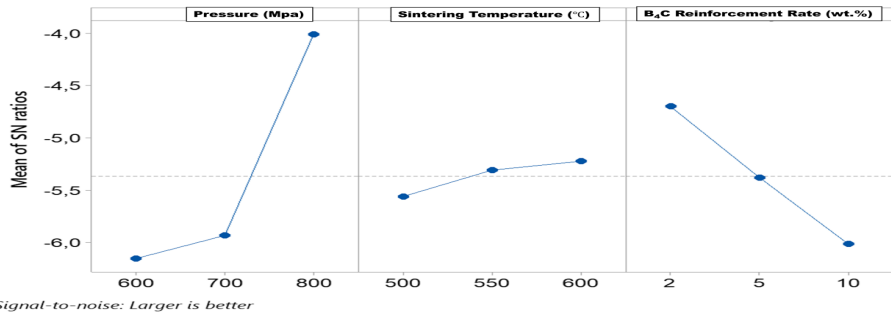
Araştırma makalesi
Başvuru: 23/08/2023
Düzeltilme: 06/09/2023
Kabul: 11/09/2023

Anahtar Kelimeler

Hibrit Kompozit
Toz Metalurjisi
Grafen Nanoplatelet
Gri İlişkisel Analiz
Taguchi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, mixture powders prepared by adding Al7075 powders containing B₄C and GNPs in different weight ratios were compressed at room temperature and different pressing pressures and sintered at different temperatures in vacuum environment. Hardness and densification values were optimized with Taguchi-based gray relationship analysis. / Bu çalışmada farklı ağırlık oranlarında B₄C ve GNPs içeren Al7075 tozlarının eklenmesiyle hazırlanan karışım tozları oda sıcaklığında ve farklı presleme basınçlarında sıkıştırılmış ve farklı sıcaklıklarda vakum ortamında sinterlenmiştir. Taguchi tabanlı gri ilişkisel analizi ile sertlik ve yoğunlaşma değerleri optimize edilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Figure A: S/N ratio for GRD / Şekil A: GRD için S/N oranları

Highlights (Önemli noktalar)

- Production of Al7075/B₄C/GNPs Hybrid Composites / Al7075/B₄C/GNPs hibrit kompoziti üretimi
- Taguchi-based gray relationship analysis / Taguchi tabanlı gri ilişkisel analizi
- Densification rate and hardness relationship / Yoğunlaşma oranı ve sertlik ilişkisi

Aim (Amaç): Determination of the most optimum production conditions for hybrid composites produced by powder metallurgy method. / Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen hibrit kompozitler için en uygun üretim koşullarının belirlenmesidir.

Originality (Özgünlük): Al7075/B₄C/GNPs Hybrid Composites were produced by solid phase sintering method. / Al7075/B₄C/GNPs Hibrit Kompozitleri katı faz sinterleme yöntemiyle üretildi.

Results (Bulgular): According to the Taguchi-based gray relational analysis methodology, the best parameter was determined as 700 MPa pressure, 600 °C sintering temperature and 2% B₄C reinforcement rate (A3-B3-C1). / Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz metodolojisine göre en iyi parametre 700 MPa basınç olarak belirlendi. 600 °C sinterleme sıcaklığı ve %2 B₄C takviye oranı (A3-B3-C1).

Conclusion (Sonuç): It has been determined that the sintering temperature is the main variable for hybrid composites produced by the solid-solid production technique in powder metallurgy. / Toz metalurjisinde katı-katı üretim tekniği ile üretilen hibrit kompozitler için sinterleme sıcaklığının ana değişken olduğu belirlenmiştir.



Taguchi Based Gray Relational Analysis of Production Parameters of Al7075/B4C/GNPs Hybrid Composites

Onur ALTUNTAŞ^{1*}

¹Department of Warfare Weapons and Tools, Alparslan Defense Sciences and National Security Institute, National Defense University, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 23/08/2023
Revision: 06/09/2023
Accepted: 11/09/2023

Keywords

Hybrid Composite
Powder Metallurgy
Graphene Nanoplatelets
Gray Relational Analysis
Taguchi

Abstract

In this study, metal matrix hybrid composites obtained by adding B₄C and graphene nanoplatelets (GNPs) powders as reinforcement elements to Al7075 powders were produced by powder metallurgy (P/M) method. Mixture powders prepared by supplementing Al7075 powders with different weight ratios of B₄C (2-5-10%) and GNPs (0.5%) are compressed at room temperature and at different pressing pressures (600-700-800 MPa) and then at different temperatures (500-550- 600°C) was sintered in vacuum atmosphere and samples were produced in accordance with ASTM G99 standard. Density and hardness analyzes were carried out depending on the changing production parameters of hybrid composites. It was determined that the pressing pressure had a direct effect on the condensation rate of the samples and the highest density value was 2.6764 g/cm³ in the Al7075+5% B₄C+0.5% GNPs sample pressed under 800MPa pressure. The hardness of the samples, on the other hand, generally increased due to the increasing amount of reinforcement element, while it also increased with the increase of pressing pressure and sintering temperature.

Al7075/B4C/GNP's Hibrit Kompozitlerin Üretim Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/08/2023
Düzeltilme: 06/09/2023
Kabul: 11/09/2023

Anahtar Kelimeler

Hibrit Kompozit
Toz Metalurjisi
Grafen Nanoplatelet
Gri İlişkisel Analiz
Taguchi

Öz

Bu çalışmada, Al7075 tozlarına takviye elemanı olarak B₄C ve grafen nanoplatelet (GNPs) tozlarının eklenmesiyle elde edilen metal matrisli hibrit kompozitler, toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle üretildi. Farklı ağırlık oranlarında B₄C (%2-5-10) ve GNPs (%0,5) içeren Al7075 tozlarının eklenmesiyle hazırlanan karışım tozlar, oda sıcaklığında ve farklı presleme basınçlarında (600-700-800 MPa) ve ardından farklı sıcaklıklarda sıkıştırılır. (500-550- 600°C) vakum ortamında sinterlenerek ASTM G99 standardına uygun numuneler üretilmiştir. Hibrit kompozitlerin değişen üretim parametrelerine bağlı olarak yoğunluk ve sertlik analizleri yapılmıştır. Presleme basıncının numunelerin yoğunluk oranına doğrudan etki ettiği ve en yüksek yoğunluk değerinin 800MPa basınç altında preslenen Al7075+%5 B₄C+%0,5 GNPs numunesinde 2,6764 g/cm³ olduğu belirlendi. Numunelerin sertliği ise takviye elemanı miktarının artmasına bağlı olarak genel olarak presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının artmasıyla da artış göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aluminum alloys are widely used in various industries due to their low density, energy efficiency in manufacturability and superior mechanical-corrosive properties[1]. Since the first development of Al 7075 alloys in the 1960s, it has been an important and indispensable material in the aviation industry, especially for the manufacture of aircraft wing pylons, airframes and rockets. It has a very common use in the automotive industry due to its

low density and superior specific strength values[2-3]. Aluminum alloys are a separate phenomenon in the industry, as research has proven that reducing the weight of a vehicle by 10% reduces fuel consumption by 1.9–8.2%, depending on the vehicle's driving style, size and model[4]. Despite the wide range of applications, aluminum alloys require even higher strength to meet the specific requirements of industrial applications. Expected mechanical strengths can be gained by applying secondary processes such as heat treatment,

thermomechanical and thermochemical treatment [5-7]. GNPs are considered as highly effective reinforcing fillers in metal matrix composites such as aluminum, iron, titanium [8-10]. Optimization of experimental parameters is the main phenomenon to obtain a better response as well as to save labor, time, materials and money in the experimental work. [11-12]. In recent years, many modeling and optimization tools such as artificial neural networks and response surface methodology have been used in many multidisciplinary studies by various researchers [13-15].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1. Experimental Equipment (Deneysel Ekipman)

In the experimental studies, spherical shaped Al7075 powders (Nanography) with 99.5% purity and an average particle size of <44 µm produced by water atomization technique were used. Al7075 matrix is composed of B4C powders (Nanography) of 99.95% purity, with different reinforcement ratios (2-5-10%) by weight and an average grain size of 44 µm, with a single layer, average powder size D50= 3µm, 800 m²/g surface area and high GNPs powders (Nanography) of purity (99.99%) were added at 0.5% by weight. In order to obtain a

2.2 Taguchi-Based Gray Relational Analysis (GRA) (Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analizi)

In recent years, Taguchi-based gray relational analysis (GIA) has been widely used to optimize parameters according to multiple outputs. At the same time, the processing outputs (responses) have different units of measurement as they are obtained using different devices. In this respect, the first operation of GIA is to accept each of these outputs as a factor and convert them to the same unit. First, experimental results are normalized to reduce variability. In other words, this procedure is a means of transferring the original sequence to a comparable sequence, thus normalizing experimental results ranging from 0 to 1. Normalization of test results can be done with the following three different approaches [16-18].

If “bigger is better”, the results are normalized to the following equation:

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \tag{1}$$

homogeneous distribution, the prepared powders were mixed with a 3D Turbula TF2 mixer for 2 hours. The resulting mixture powders were shaped in accordance with ASTM G-99 standards under varying pressure (600-700-800MPa) with the help of a hydraulic press at room temperature. All samples were sintered at different temperatures (500-550-600°C) for 30 minutes in a vacuum atmosphere of 5x10⁻² Pa. The densities of hybrid composite (HC) samples with different production parameters and chemical compositions after pressing and sintering were determined according to ASTM B962-17 standard using an electronic density meter (A&D HR-250AZ) according to Archimedes principle. Conventional metallography processes were applied to all samples to reveal the microstructures and etched with Keller's solution (95% H₂O, 1.5% HCl, 1% HF and 2.5% HNO₃). HV0.5 microhardness measurements of the samples according to ASTM E384 were made with a Qness 60 M EVO tester using a diamond tip under 0.5 kg (4.9N) load. Taguchi-based gray relational analysis methodology was successfully applied for HV. d and P simultaneously in the multi-response optimization process. Accordingly, the best parameters were determined as 700 MPa pressure, 600 °C sintering temperature and 2% B4C reinforcement ratio (A3-B3-C1).

If “smaller is better,” the results are normalized to the following equation:

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \tag{2}$$

If “nominal is better”, the results are normalized to the following equation:

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \tag{3}$$

Then, the gray relational coefficient (GRC) is calculated based on the normalized test results to define the relationship between the expected and actual experimental values. GRC can be found using the following equation:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \tag{4}$$

Then, using the GRCs, its value is found as a relational degree of gray (GRD). GRD is found using the following equation:

$$\Upsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \tag{5}$$

In the last step of the Gray Relational Analysis based on the Taguchi method, the optimum levels of the parameters are found by considering the S/N ratio for GRA. Therefore, since a higher VAR is targeted, the “bigger is better” case is used to obtain the best parameters for multi-response optimization [17,19]. For a higher GRA, the signal-to-noise (S/N) values are obtained using the following equation:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \tag{6}$$

Finally, validation experiments are performed at optimal process parameters to confirm the multiple response optimization. Therefore, the estimated GRD at optimal parameters is defined by the following equation:

$$\eta_{predicted} = \eta_m + \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m) \tag{7}$$

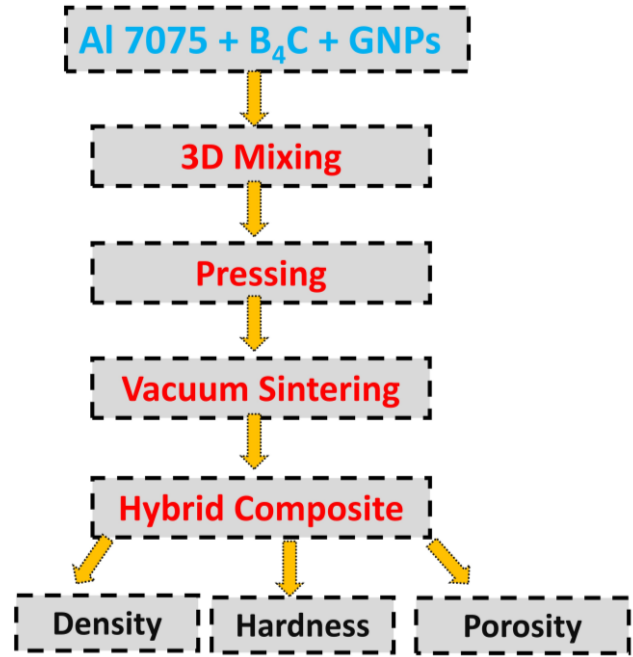


Figure 1. Experimental studies flow chart (Deneysel çalışmalar akış şeması)

3. RESULTS (BULGULAR)

The % porosity values of the samples after sintering were calculated using equation (1). It was determined that the porosity of the samples decreased and their density increased depending on the increasing pressing pressure and presented in Table 1.

$$Porosity(\%) = \frac{Theoretical\ Density - Sintering\ Density}{Theoretical\ Density} \times 100 \tag{1}$$

Table 1. Hardness-density values of HC samples produced in different variables (Farklı değişkenlerde üretilen HC numunelerinin sertlik-yoğunluk değerleri)

Test Sample			Experimental Measurements		
Pressing Pressure (MPa)	Sintering Temperature (°C)	B ₄ C Reinforcement Ratio (%)	Hardness (HV0.5)	Density (g.cm ⁻³)	Pore Ratio (%) (%)
600	500	2	73	2.5291	9.67
600	550	5	71	2.6079	6.86
600	600	10	69	2.6278	6.15
700	500	5	74	2.5793	7.88
700	550	10	79	2.6081	6.85
700	600	2	75	2.6439	5.57
800	500	10	79	2.5917	7.43
800	550	2	85	2.6181	6.49
800	600	5	83	2.6764	4.41

3.1. Multiple Optimization (Çoklu Optimizasyon)

In the second stage of this study, the mixture powders prepared by supplementing Al7075 powders with different weight ratios of B4C (2-5-10%) and GNPs (0.5%) were compressed at room temperature and at different pressing pressures

(600-700-800 MPa) and then at different temperatures. (500-550-600°C) vacuum atmosphere and optimized according to the results of hardness, density and pore ratio for samples conforming to ASTM G99 standard.

Table 2. Gray relational analysis results (Gri ilişkisel analiz sonuçları)

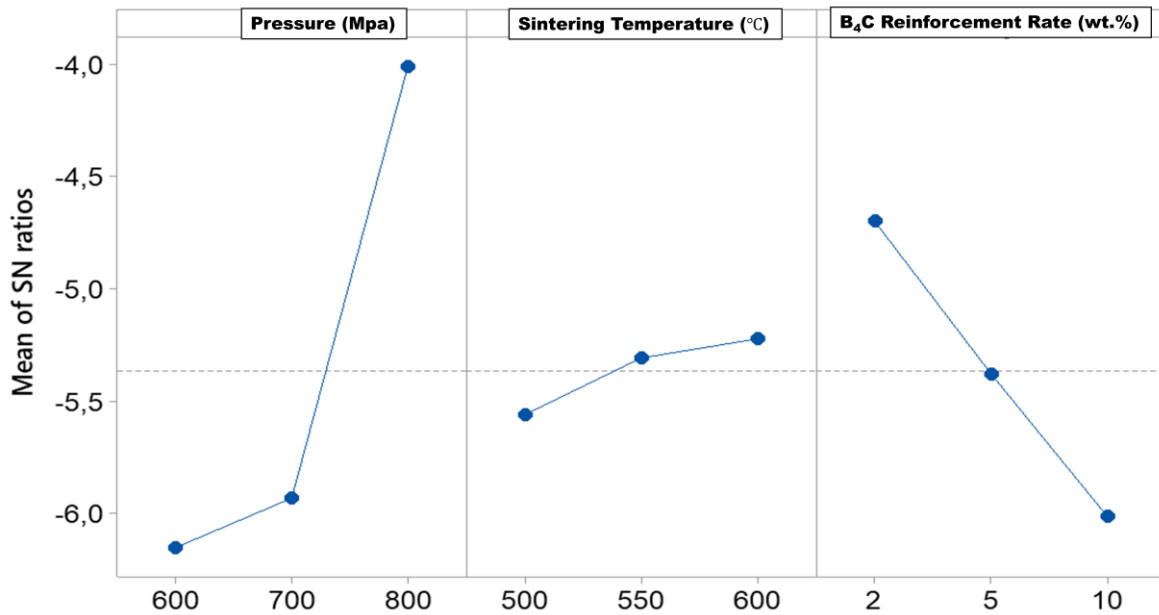
Experiment no	Experiment results			Normalized values			Coefficients					
	HV	D	P	HV	D	P	HV	D	P	GRD	S/N	Serie
1	73	2.5291	9.6750	0.250	1.000	0.000	0.400	1.000	0.333	0.578	-4.76478	3
2	71	2.6079	6.8607	0.125	0.465	0.535	0.364	0.483	0.518	0.455	-6.84066	8
3	69	2.6278	6.1500	0.000	0.330	0.670	0.333	0.427	0.602	0.454	-6.85177	9
4	74	2.5793	7.8821	0.313	0.659	0.341	0.421	0.595	0.431	0.482	-6.33272	7
5	79	2.6081	6.8536	0.625	0.464	0.536	0.571	0.482	0.519	0.524	-5.60923	5
6	75	2.6439	5.5750	0.375	0.221	0.779	0.444	0.391	0.694	0.510	-5.85374	6
7	79	2.5917	7.4393	0.625	0.575	0.425	0.571	0.541	0.465	0.526	-5.58531	4
8	85	2.6181	6.4964	1.000	0.396	0.604	1.000	0.453	0.558	0.670	-3.47428	2
9	83	2.6764	4.4143	0.875	0.000	1.000	0.800	0.333	1.000	0.711	-2.96125	1

For this reason. Taguchi-based gray relational analysis methodology was used to improve and optimize the parameters affecting the results. In the current study, a "bigger is better" approach to simultaneously increase HV and a "smaller is better" approach to minimize d and P was applied in the multi-response optimization process [19]. First, the experimental results are normalized using equation 2. Equations 4 and 5 were used for GRC and GRG values, respectively. In addition, the S/N values of the multiple response were obtained by equation 6. The values obtained as a result of the experiments and calculations are given in Table 4.

In this table, the high GRD value indicates the optimum level, with a strong relationship between the experimental results and the normalized values. Also, the response table for GRD is given in Table 3. The maximum value corresponding to each parameter in this table represents the optimum level. From now on, the optimal parameter level can be determined using Figure 2 and/or the response table. Accordingly, the best combination parameters are; 700 MPa pressure, 600 °C sintering temperature and 2% B4C reinforcement ratio (A3-B3-C1).

Table 3. Response table for GRD (GRD için yanıt tablosu)

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Difference
Pressure, MPa	0.496	0.505	0.636	0.140
Sintering Temperature, °C	0.529	0.550	0.558	0.030
B ₄ C reinforcement ratio, %	0.586	0.549	0.501	0.084



Signal-to-noise: Larger is better

Figure 2. S/N ratio for GRD (GRD için S/N oranı)

3.2. Verification of Optimization (Optimizasyon Doğrulaması)

The last step in Taguchi-based gray relational analysis is the verification of the determined optimum parameter. For this purpose, the GRD ($\eta_{\text{predicted}}$) estimation process was obtained using equation 7 with a confidence level of 0.05.

Confirmation experiments were performed three times using the determined optimum parameters. After taking the average of the test results, the HV, d and P values obtained as 81 hardness, 2.6465 g.cm^{-3} density and 3.3245% porosity, respectively, are given in Table 4.

Table 4. Confirmation experiment results (Doğrulama deneyi sonuçları)

	Initial parameter	Optimal parameter	
		Estimated	Experimental
Level	A2-B2-C2	A3-B3-C1	A3-B3-C1
HV	75		81
d (g.cm^{-3})	2.5976		2.6465
P (%)	7.2541		3.3245
GRG	0.481	0.6888	0.920
amount of recovery = 0.439			

When the results are evaluated, it is seen that the estimated results are better. It was observed that there was a good correlation between the estimated GRD and the experimental GRD results. In the light of the results, the amount of improvement in GRD

from the initial parameters to the optimum parameters was 0.439. The values obtained from the validation test showed that the GRG values were consistent with the confidence interval limits. In conclusion, Taguchi-based gray relational analysis

methodology has been successfully applied for HV. d. and P.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study. the mixture powders prepared by supplementing Al7075 powders with different weight ratios of B4C (2-5-10%) and GNPs (0.5%) were compressed at room temperature and different pressing pressures (600-700-800 MPa) and then at different temperatures (500 MPa). -550-600°C) was sintered in vacuum atmosphere and optimized according to the results of hardness. density and pore ratio for samples conforming to ASTM G99 standard.

The summarized results are given below:

- The highest hardness value was measured as 85 HV in the sample containing 2% B4C at 800 MPa compression pressure at 550°C.
- Taguchi-based gray relational analysis methodology was successfully applied for HV. d and P simultaneously in the multi-response optimization process. Accordingly. the best parameters were determined as 700 MPa pressure. 600 °C sintering temperature and 2% B4C reinforcement ratio (A3-B3-C1).
- As a result of validation experiments with optimum parameters. an improvement of 0.439 was obtained.

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)

Onur ALTUNTAŞ: 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] X.Y. Liu. Q.L. Pan. X. Fan. Y.B. He. W.B. Li. W.J. Liang. Microstructural evolution of Al-Cu-Mg-Ag alloy during homogenization. *J. Alloys Compd.* 484 (2009) 790–794.
- [2] K.R. Ramkumar. S. Sivasankaran. F.A. Al-mufadi. S. Siddharth. and R. Raghu. Investigations on microstructure. mechanical. and tribological behaviour of AA7075-x wt.% TiC composites for aerospace applications. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 19(2019). No. 2. p. 428.
- [3] Mondolfo. L. F. (2013). *Aluminum alloys: structure and properties.* Elsevier.
- [4] Wohlecker. R.. Johannaber. M.. & Espig. M. (2007). Determination of weight elasticity of fuel economy for ICE. hybrid and fuel cell vehicles (No. 2007-01-0343). *SAE Technical Paper.*
- [5] Altuntaş. G.. & Bostan. B. 7075 Al Alaşımına Uygulanan Kriyojenik ve Doğal Yaşlandırma İşleminin Avrami Parametresine Etkisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology.* 10(4). 691-698.
- [6] Altuntaş. G.. Altuntaş. O.. & Bostan. B. (2021). Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects. *Transactions of the Indian Institute of Metals.* 74. 3025-3033.
- [7] Zhang. J.. & Peng. J. (2023). A review on aluminum alloy conductors influenced by alloying elements and thermomechanical treatments: Microstructure and properties. *Journal of Materials Research.* 1-22.
- [8] Zhang, H., Xu, C., Xiao, W., Ameyama, K., & Ma, C. (2016). Enhanced mechanical properties of Al5083 alloy with graphene nanoplates prepared by ball milling and hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A,* 658, 8-15.

- [9] Du, X., Du, W., Wang, Z., Liu, K., & Li, S. (2018). Ultra-high strengthening efficiency of graphene nanoplatelets reinforced magnesium matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 711, 633-642.
- [10] A. Dorri Moghadam, E. Omrani, P.L. Menezes, P.K. Rohatgi, Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene – A review, *Compos. Part B Eng.* 77 (2015) 402–420.
- [11] Kumar, R.; Chauhan, S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2015, 65, 166–180.
- [12] Alam, M. A., Ya, H. H., Yusuf, M., Sivraj, R., Mamat, O. B., Sapuan, S. M., ... & Sattar, M. (2021). Modeling, optimization and performance evaluation of tic/graphite reinforced al 7075 hybrid composites using response surface methodology. *Materials*, 14(16), 4703.
- [13] Yusuf, M.; Farooqi, A.S.; Alam, M.A.; Keong, L.K.; Hellgardt, K.; Abdullah, B. Response surface optimization of syngas production from greenhouse gases via DRM over high performance Ni–W catalyst. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021.
- [14] Surya, M. S., Prasanthi, G., & Gugulothu, S. K. (2021). Investigation of mechanical and wear behaviour of Al7075/SiC composites using response surface methodology. *Silicon*, 13, 2369-2379.
- [15] Muthukrishnan, N., & Davim, J. P. (2009). Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis. *Journal of materials processing technology*, 209(1), 225-232.
- [16] Kalyon. A.. Günay. M.. & Özyürek. D. (2018). Application of grey relational analysis based on Taguchi method for optimizing machining parameters in hard turning of high chrome cast iron. *Advances in Manufacturing*. 6(4). 419-429.
- [17] Çakıroğlu. R. (2021). Machinability Analysis of Inconel 718 Superalloy with AlTiN-Coated Carbide Tool Under Different Cutting Environments. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 1-19.
- [18] Uzun. G. (2019). Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons. *Measurement*. 142. 122-130.
- [19] Çakıroğlu. R.. & Günay. M. (2020). Comprehensive analysis of material removal rate. tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(4). 7305-7317.

N-Benziletilediamin Birimi İçeren Yeni Schiff Bazlarının Sentezi, Karakterizasyonu ve İnsan Kolon Kanseri Hücreleri Üzerine Sitotoksik Etkilerinin Belirlenmesi

Fatma Hamurcu^{1*} 

¹Bartın University Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, Bartın, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/08/2023
Düzeltilme: 06/09/2023
Kabul: 13/09/2023

Anahtar Kelimeler

Schiff bazı
N-benziletilediamin
Antikanser aktivite

Article Info

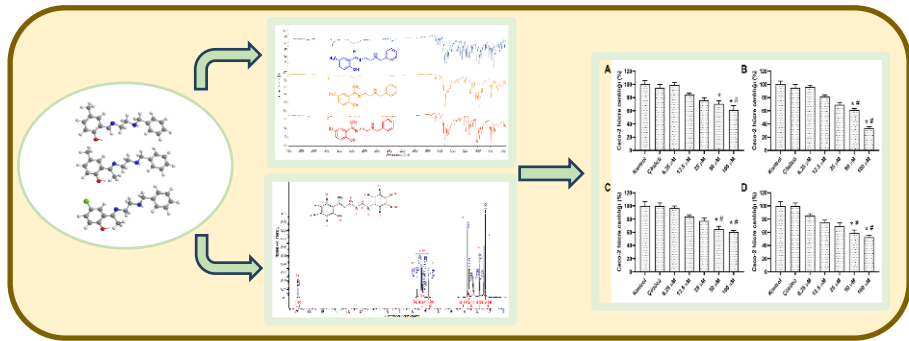
Research article
Received: 21/08/2023
Revision: 06/09/2023
Accepted: 13/09/2023

Keywords

Schiff base
N-benzylethylenediamine
Anticancer activity

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada üç yeni Schiff bazı bileşiği sentezlendi ve karakterize edildi. Bileşiklerin sitotoksik aktiviteleri insan kolon kanseri hücre dizileri kullanılarak araştırıldı. / In this study, three new Schiff base compounds were synthesized and characterized. The cytotoxic activities of the compounds were investigated using the human colon cancer cell lines.



Şekil A: Sentezlenen bileşiklerin karakterizasyonu ve sitotoksik aktivitelerinin araştırılması / **Figure A:** Characterization of synthesized compounds and investigation of their cytotoxic activities

Önemli noktalar (Highlights)

- Yeni Schiff bazlarının sentezi / Synthesis of new Schiff bases
- Bileşiklerin yapı aydınlatması / Structure elucidation of compounds
- Caco-2 ve HT-29 hücrelerinde yüksek sitotoksik aktivite / High cytotoxic activity in Caco-2 and HT-29

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı yeni sentezlenen N-benzil etilen diamin türevi bileşiklerin kanser hücreleri üzerindeki potansiyel toksisitesinin belirlenmesidir. / The aim of this study is to determine the potential toxicity of newly synthesized N-benzyl ethylene diamine derivative compounds on cancer cells.

Özgünlük (Originality): Çalışmada sentezlenen N-benzil etilen diamin türevi bileşikler orjinaldir ve ilk defa raporlanmaktadır. / The N-benzyl ethylene diamine derivative compounds synthesized in the study are original and are reported for the first time.

Bulgular (Results): Sentezlenen tüm bileşiklerin 50 ve 100 µM dozlarında Caco-2 kolon ve HT-29 kolon karsinomu hücrelerine karşı kontrol grubuna göre güçlü sitotoksik etki gösterdiği gözlemlendi. / It was observed that all synthesized compounds, 50 and 100 µM doses, exhibited strong cytotoxic effects against Caco-2 colon and HT-29 colon carcinoma cells compared to the control group.

Sonuç (Conclusion): Genel olarak, yeni sentezlenen bileşiklerin Caco-2 kolon ve HT-29 kolon karsinomu hücre hatlarında sitotoksik etkisi, standart kemoterapötik 5-FU'nun hücre hatlarında sitotoksik etkisine benzerdir. Mevcut literatür ve çalışma sonuçları, bileşiklerin kolon kanseri tedavisi için potansiyel ajanlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. / Overall, the cytotoxic effect of the newly synthesized compounds in Caco-2 colon and HT-29 colon carcinoma cell lines is similar to the cytotoxic effect of standard chemotherapeutic 5-FU in cell lines. The available literature and study results indicate that the compounds can be evaluated as potential agents for colon cancer therapy.



N-Benziletilendiamin Birimi İçeren Yeni Schiff Bazlarının Sentezi, Karakterizasyonu ve İnsan Kolon Kanseri Hücreleri Üzerine Sitotoksik Etkilerinin Belirlenmesi

Fatma Hamurcu^{1*}

¹Bartın University Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, Bartın, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/08/2023
Düzeltilme: 06/09/2023
Kabul: 13/09/2023

Anahtar Kelimeler

Schiff bazı
N-benziletilendiamin
Antikanser aktivite

Öz

Bu çalışmada N-benziletilendiamin ile 2-hidroksi-5-metilbenzaldehit, 2-hidroksi-5-metilasetofenon, 2-hidroksi-5-kloroasetofenon bileşiklerinin kondenzasyon reaksiyonu sonucu üç yeni Schiff bazı sentezlendi (L1, L2 ve L3). Sentezlenen yeni bileşiklerin yapıları, ¹H NMR, ¹³C NMR, FT-IR ve elemental analiz yöntemleri ile karakterize edildi. Daha sonra, elde edilen bileşiklerin sitotoksik aktiviteleri, insan kolon kanser hücre dizisi (Caco-2, kolon ve HT-29 kolon karsinoma hücre dizisi) kullanılarak araştırıldı. Elde edilen sonuçlar standart kemoterapi ilacı 5-Fluorourasil (5-FU) ile karşılaştırıldı. Sitotoksikite sonuçlarına göre L2 bileşiğinin Caco-2 (kolon) ve HT-29 (kolon) hücre hatlarında en yüksek antikanser aktiviteye sahip olduğu bulundu.

Synthesis and Characterization of New Schiff Bases Containing N-Benzylethylenediamine Unit and Determination of Their Cytotoxic Effects on Human Colon Cancer Cells

Article Info

Research article
Received: 21/08/2023
Revision: 06/09/2023
Accepted: 13/09/2023

Keywords

Schiff base
N-benzylethylenediamine
Anticancer activity

Abstract

In this study, three new Schiff bases were synthesized as a result of the condensation reaction of N-benzylethylenediamine and 2-hydroxy-5-methylbenzaldehyde, 2-hydroxy-5-methylacetophenone, 2-hydroxy-5-chloroacetophenone compounds (L1, L2 and L3). The structures of the newly synthesized compounds were characterized by ¹H NMR, ¹³C NMR, FT-IR and elemental analysis methods. Next, the cytotoxic activities of the obtained compounds were investigated using human colon cancer cell lines (Caco-2, colon and HT-29 colon carcinoma cell lines). The results obtained were compared with the standard chemotherapy drug 5-Fluorouracil (5-FU). According to cytotoxicity results, L2 compound was found to have the highest anticancer activity in Caco-2 (column) and HT-29 (column) cell lines.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Koordinasyon kimyası alanında önemli bir ligand sınıfı olan Schiff bazları, imin (C=N) veya azometin (C=N) grubu içeren bileşiklerdir [1-2]. Schiff bazı ligandlarının geniş uygulama alanı bulmalarının başlıca nedenleri arasında, kolay sentezlenmeleri ve oldukça kararlı bileşikler olmaları sayılabilir. [3-4]. Bu nedenle Schiff bazları tıp ve eczacılık [5, 6], kimyasal kataliz [7] ve kimyasal analiz [8] gibi birçok alanda odak noktası haline gelmiştir. Aldehit veya ketonların karbonil birimi (C=O) ile hidrazin bileşiklerinin NH₂ grubu arasındaki kondenzasyon reaksiyonu sonucunda karakteristik imin (C=N) bileşikleri oluşur [9-10]. Schiff bazının

oluşumundan sonra, bileşikteki N-H grupları da nükleofilik reaksiyonlarda rol oynayabilir [11]. Schiff bazı ligandları, çeşitli koordinasyon modları ve çeşitli uygulamalar nedeniyle oldukça dikkat çeken organik bileşik sınıflarından biridir [12-17]. Schiff bazları, çeşitli organik substratlar için yapı taşları olarak da kullanılabilen çok yönlü ligandlardır. Yapısal çeşitlilikleri, metalik iyonlar etrafında çeşitli koordinasyon geometrilerine sahip çeşitli moleküler yapıları kolayca oluşturan çok sayıda donör veya alıcının dahil edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, Schiff bazı ligandları, çeşitli biyomoleküllerin biyoaktivitesini ve yapılarını tanımlamak için biyolojik modeller olarak hizmet etmiştir [16-17]. Biyolojik aktivite için kritik öneme

sahip bu reaktif gruplar, doğal ya da sentetik Schiff bazlarında bulunabilir [18]. Schiff bazı ligandlarındaki oksijen ve azot atomlarının koordinasyon yetenekleri, birçok biyolojik sisteme benzer şekilde davranmalarını sağlar [19]. Bu nedenle bu bileşiklerin antikanser [20], enzim inhibisyonu [21], antibakteriyel, antifungal [22] ve antioksidan [19] aktivite gibi potansiyel biyolojik özelliklere sahip olduğunu bildiren çalışmalar yapılmıştır.

Kanser, hücre içi ve hücre dışı farklı fizyolojik ve moleküler süreçlerin bozulması sonucu meydana gelen ve hücrenin kontrolsüz bölünmesiyle karakterize edilen bir hastalıktır [23]. Kanser oluşumuna neden olan iç faktörler, kalıtsal ve rasgele mutasyonlar, bağışıklık koşulları ve hormonal faktörler olarak sıralanabilir. Radyasyona maruz kalma, bulaşıcı mikroorganizmalar, tütün kullanımı ve kimyasallar dış faktörler olarak tanımlanabilir [24]. Dünya sağlık örgütünün 2020 yılı verilerine göre, dünyada yaklaşık 10 milyon insan kanser nedeniyle hayatını kaybetmiştir [25]. Kanser hücrelerinin evreleri ve türleri uygulanacak tedavinin yöntemini belirler. Cerrahi müdahale, kemoterapi ve radyoterapi bu sürecin zorlu prosedürleri arasında yer alır [26]. Günümüzde bu prosedürlerin kombinasyonu şeklinde uygulanan tedavi süreçleri vardır. Ne yazık ki bu hastalığın heterojenliği çoğu durumda tedavinin başarısız olmasına neden olur. Bu kapsamda birçok araştırmacı bu karmaşık hastalık grubu üzerinde yeni terapötiklerin tasarımı ve geliştirilmesi amacıyla bu alana odaklanmışlardır. Bu nedenle araştırmacıların kanserli hücrelerle mücadele için yeni terapötik ajanları keşfetmesi tedavi başarısının artmasına yardımcı olacaktır [26].

Bu çalışmanın amacı yeni sentezlenen N-benzil etilen diamin türevi bileşiklerin kanser hücreleri

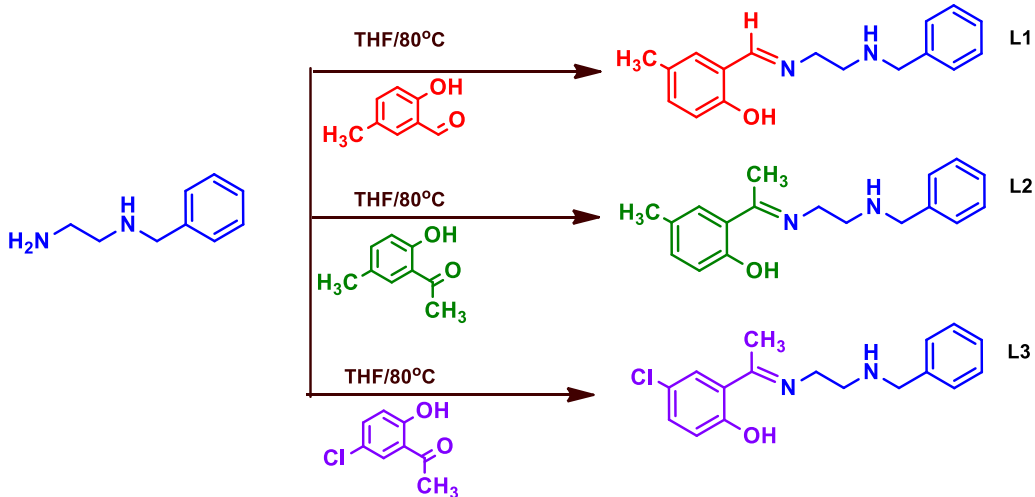
üzerine potansiyel toksisitesini belirlemektir. Bu amaçla, N-benzil etilen diamin ile üç farklı aldehit/keton bileşiğinin kondenzasyon reaksiyonu sonucunda üç yeni Schiff bazı (L1: (E)-2-(((2-(benzilamino)etil)imino)metil)-4-metilfenol, L2: (E)-2-(1-((2-(benzilamino)etil)imino)etil)-4-metilfenol, L3: (E)-2-(1-((2-(benzilamino)etil)imino)etil)-4-klorofenol) sentezlendi [27] ve karakterize edildi. Bileşiklerin insan kolon kanseri hücre serileri üzerine sitotoksik etkisi standart kemoterapi ilacı 5-florourasil (5-FU) ile karşılaştırılarak değerlendirildi. Çalışma sonuçları, elde edilen yeni bileşiklerin güçlü sitotoksik etkiler ortaya koyduğunu göstermektedir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bileşiklerin element analizi Flash 2000 Thermo cihazı ile standart mikroanalitik prosedürlere göre yapıldı. ^1H - ^{13}C NMR spektrumları, Agilent VNMRS 500 MHz spektrometre cihazıyla, dimetilsülfoksit-d6 (DMSO-d6) çözeltilerinin, iç standart olarak tetrametilsilan kullanımıyla kaydedildi. Bileşiklerin IR spektrumları, Perkin Elmer Clarus 500 FT-IR cihazında alındı. Bileşiklerin erime noktaları, Buchi B540 erime noktası cihazıyla belirlendi. N-benziletilediamin, 2-hidroksi-5-metil-salisilaldehit, 2-hidroksi-5-metil-asetofenon ve 2-hidroksi-5-kloro-asetofenon bileşikleri Sigma-Aldrich firmasından temin edildi.

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

Bileşikler (L1-L3); 2-hidroksi-5-metil-salisilaldehit, 2-hidroksi-5-metil-asetofenon ve 2-hidroksi-5-kloro-asetofenonun, N-benziletilediamin bileşiği ile kondenzasyon tepkimesine göre sentezlenmiştir. Bileşiklerin sentez yöntemi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Bileşiklerin sentez yöntemi (Synthesis method of compounds)

2.1.1. L1 Bileşiminin Sentezi (Synthesis of L1 Compound)

0,150 g (1 mmol) N-benziletildiamin 5 mL THF'de çözüldü, üzerine 5 mL THF'de çözülmüş 0,14 g (1 mmol) 2-hidroksi-5-metilbenzaldehit çözeltisi damla damla ilave edildi. 24 saat 80°C de geri soğutucu altında karıştırılarak çöken krem rengi ürün süzüldü, n-hekzan ile yıkanıp kurutuldu. Verim : % 90, E.N: 130-132 °C.

2.1.2. L2 Bileşiminin Sentezi (Synthesis of L2 Compound)

0,15 g (1 mmol) N-benziletildiamin 5 mL THF'de çözüldü, üzerine 5 mL THF'de çözülmüş 0,16 g (1 mmol) 2-hidroksi-5-metilasetofenon çözeltisi damla damla ilave edildi. 24 saat 80°C de geri soğutucu altında karıştırılarak çöken sarı renkli ürün süzüldü, n-hekzan ile yıkanıp kurutuldu. Verim : % 95, E.N: 140-142 °C.

2.1.3. L3 Bileşiminin Sentezi (Synthesis of L3 Compound)

0,15 g (1 mmol) N-benziletildiamin 5 mL THF'de çözüldü, üzerine 5 mL THF'de çözülmüş 0,17 g (1 mmol) 2-hidroksi-5-kloroasetofenon çözeltisi damla damla ilave edildi. 24 saat 80°C de geri soğutucu altında karıştırılarak çöken sarı renkli ürün süzüldü, n-hekzan ile yıkanıp kurutuldu. Verim : % 92, E.N: 136-138 °C.

2.2. Hücre Kültürü (Cell Culture)

Sentezlenen bileşiklerin sitotoksik etkilerinin belirlenmesi amacıyla HT-29 ve Caco-2 olmak üzere iki farklı kolon kanser hücre serisi kullanıldı. Ht-29 hücreleri RPMI-1640 medyum ile Caco-2 hücreleri DMEM medyumunu ile beslendi. Her iki medyum çözeltisi de %10 Fetal Bovin Serum (FBS), 0,1 mg/mL streptomisin ve 100 U/mL penisilin eklenerek hazırlandı. Karbondioksitli (%5 CO₂) inkübatörde, 37 °C'de ve nemli ortamda tutulan hücrelerin medyumları haftada iki defa değiştirildi. Hücreler konfluent olduğunda, tripsin-EDTA solüsyonu kullanılarak flasklardan söküldü. Hücreler sayımı yapıldıktan sonra her bir kuyucuğa yaklaşık 15.000 hücre gelecek şekilde 96 kuyucuklu plaklara ekildi. Sonrasında plakalar 24 saat inkübasyona bırakıldı.

2.2.1. Test Ajanları ile Muamele (Treatment with Testing Agents)

Sentezlenen bileşiklerin ve 5-FU'nun DMSO ile hazırlanan farklı konsantrasyonları hücrelerin içinde bulunduğu kuyucuklara ilave edildi (final hacim 1µL). 24 saat inkübasyondan sonra hücre canlılığındaki değişimler MTT (3-[4,5-dimetiltiazol-2-il]-2,5 difenil tetrazolyum bromür) yöntemiyle belirlendi.

Öncelikle kuyucuklardaki medyum aspire edildi ve sonrasında 0,5 mg/mL MTT solüsyonundan her bir kuyucuğa 50 µL eklendi. 3 saat sonunda kuyucuklardaki solüsyon aspire edildi ve her bir kuyucuğa 100 µL DMSO ilave edildi. Plakalar 570 nm dalga boyunda okundu (Thermo Multiskan Go, ABD) ve kontrol grubundaki absorbans değerlerine kıyasla uygulama gruplarındaki canlılık değişim değerleri hesaplandı [28]. Her bir bileşimin etkisi 5 tekrar yapılarak belirlendi (n=5).

2.2.2. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

MTT analizleri sonrası elde edilen değerler GraphPad Prism (V8) programı kullanılarak değerlendirildi. Verilerin normallik dağılımları Shapiro Wilk testi ile analiz edildi. Sonrasında nicel değişkenlerin gruplar arası karşılaştırılmaları Kruskal Wallis H testi ile gerçekleştirildi. Kontrol ve uygulama grupları arasındaki ikili karşılaştırmalarda Dunn'ın Çoklu Karşılaştırma Testi kullanıldı. Veriler ortalama ± standart sapma olarak sunuldu. p<0.05 değeri istatistiksel olarak önemli kabul edildi.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Bileşiklerin Karakterizasyonu (Characterization of Compounds)

Bileşiklerin (L1-L3) analitik verileri ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

3.1.1. FT-IR Spektrumları (FT-IR Spectra)

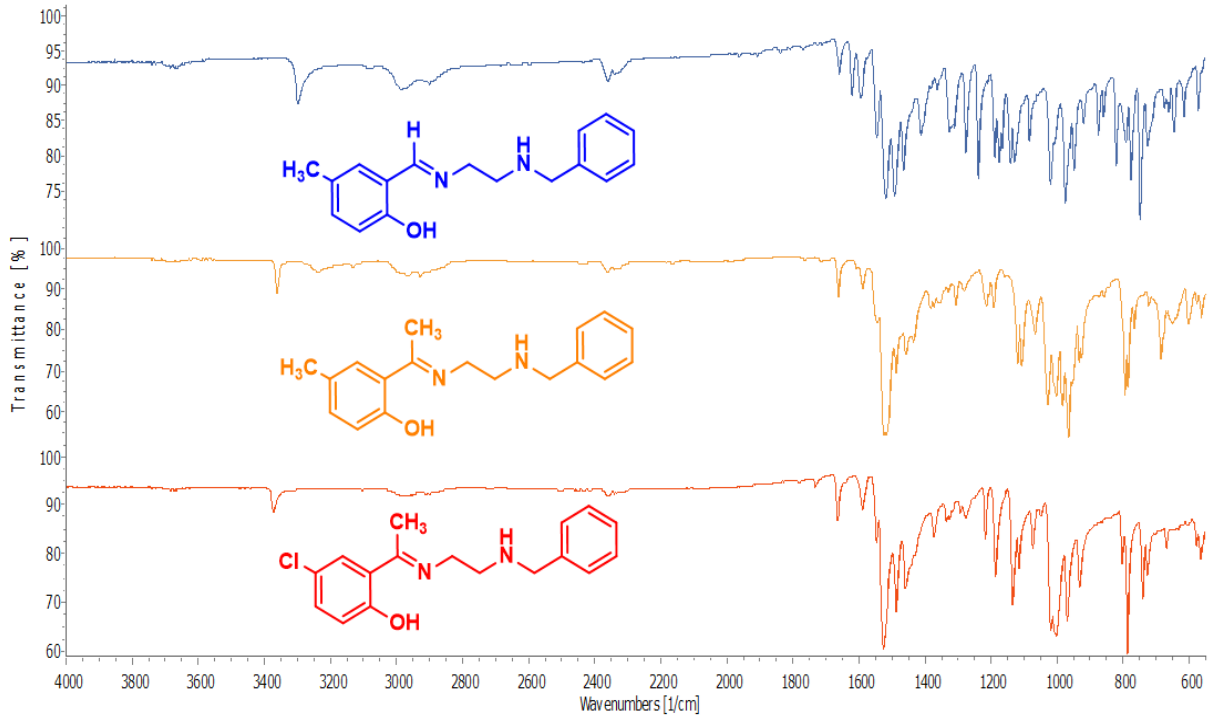
Sentezlenen bileşiklerin (L1-L3) seçilmiş titreşim frekansları Tablo 2'de, bileşiklere ait FT-IR spektrumları Şekil 2'de verildi. L1-L3 bileşiklerinin IR spektrumları incelendiğinde 3373-3299 cm⁻¹ bölgesinde gözlenen bantların (N-H) gerilme titreşimlerine ait olduğu düşünülmektedir. L1, L2 ve L3 bileşiklerindeki imin (C=N) grubunun gerilme titreşim bantları sırasıyla 1660 cm⁻¹, 1662 cm⁻¹ ve 1665 cm⁻¹'de gözlenirken, fenolik OH gerilme titreşimlerinin soğurma bantları sırasıyla 1276 cm⁻¹, 1281 cm⁻¹ ve 1277 cm⁻¹'de gözlemlendi.

Tablo 1. Bileşiklerin analitik verileri ve bazı fiziksel özellikleri (Analytical data and some physical properties of compounds)

Bileşik	Molekül Formülü (MA)	Renk	E.N. (°C)	Verim (%)	Deneysel (teorik)			
					%C	%H	%N	%Cl
L1	C ₁₇ H ₂₀ N ₂ O (268,35 g/mol)	Beyaz	130-132	90	75,25 (76,09)	7,03 (7,51)	9,86 (10,44)	-
L2	C ₁₈ H ₂₂ N ₂ O (282,38 g/mol)	Sarı	140-142	95	75,96 (76,09)	7,66 (7,85)	8,48 (9,92)	-
L3	C ₁₇ H ₁₉ ClN ₂ O (302,80 g/mol)	Sarı	136-138	92	55,09 (67,43)	2,51 (6,32)	9,01 (9,25)	10,23 (11,71)

Tablo 2. Bileşiklere ait seçilmiş titreşim dalga sayıları (cm⁻¹) (Selected vibration wave numbers of the compounds (cm⁻¹))

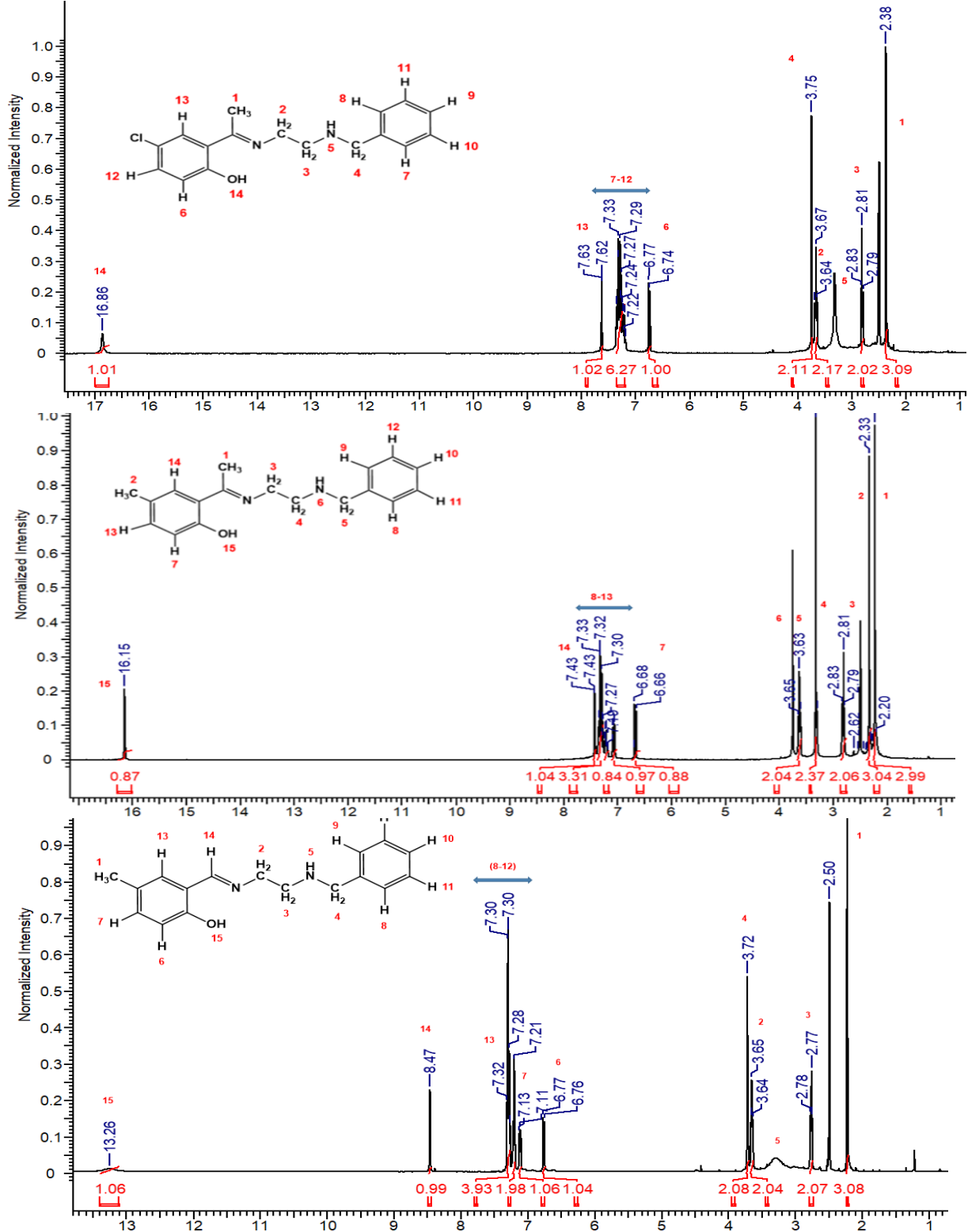
İşaretleme	L1	L2	L3
ν(NH)	3299	3363	3373
ν(CH) _{Ar.}	3088	3131	3104
ν _{as} (CH ₃)	2988	2967	2988
ν _s (CH ₃)	2901	2928	2901
ν(C=N)	1660	1662	1665
ν(C-O)	1276	1281	1277

**Şekil 2.** Bileşiklere ait FTIR spektrumları (FTIR spectra of compounds)

3.1.2. NMR Spektrumları (NMR Spectra)

(L1-L3) bileşiklerinin ^1H NMR spektrumları Şekil 3'de gösterildi ve bu spektrumların kimyasal kayma değerleri Tablo 3'te verildi. L1, L2 ve L3 bileşiklerinde düşük alanda gözlenmesi beklenen aromatik halkaya bağlı fenolik O-H protonları beklendiği gibi sırasıyla 13,26 ppm, 16,15 ppm ve

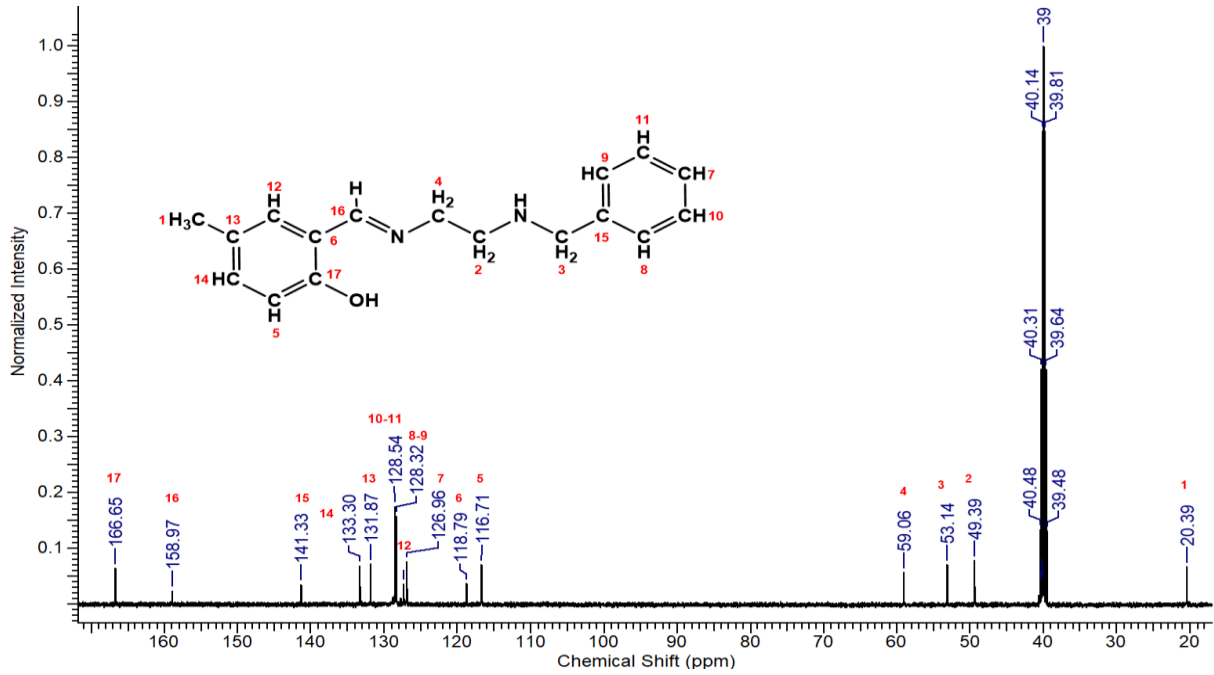
16,86 ppm'de gözlemlendi. Aldehit temelli L1 bileşiğinde imin karbonuna bağlı proton ($\text{H}-\text{C}=\text{N}$) 8,47 ppm'de gözlenirken; L2 ve L3 bileşiklerinde metil gruplarına ait protonlar ($\text{H}_3\text{C}-\text{C}=\text{N}$) sırasıyla 2,33 ppm ve 2,38 ppm'de gözlemlendi. Aynı zamanda L1 ve L2 bileşiklerinde aromatik halkaya bağlı metil protonlarına ait sinyaller ($\text{Ar}-\text{CH}_3$) 2,23 ppm'de gözlemlendi [27].



Şekil 3. Ligandlara ait ^1H NMR spektrumları (^1H NMR spectra of ligands)

L1-L3 bileşiklerinde imin azotuna bağlı metilen protonları (C=N-CH₂) sırasıyla 3,65 ppm, 3,32 ppm ve 3,67 ppm'de gözlenirken, bu gruba komşu diğer metilen protonları sırasıyla (-CH₂-CH₂) 2,77 ppm ve 2,81 ppm'de gözlemlendi. Benzil grubuna ait protonlar (CH₂-Ar), L1-L3 bileşiklerinde sırasıyla 3,72 ppm, 3,63 ppm ve 3,75 ppm'de gözlenirken N-H protonları 3,35 ppm, 3,75 ppm ve 3,33 ppm'de gözlemlendi. Son olarak L1, L2 ve L3 bileşiklerinde toplam 8 protona ait Ar-H proton sinyalleri 6,66-7,63 ppm aralığında gözlemlendi [27].

Şekil 4'de verilen L1 bileşiğine ait ¹³C NMR spektrumunda C-OH sinyali 166,65 ppm'de; imin karbonuna ait sinyal (H-C=N) 158,97 ppm'de; Ar-C karbon sinyalleri 141,33-116,71 ppm aralığında; imin azotuna bağlı metilen karbonu (C=N-CH₂) 59,06 ppm'de; benzil grubuna ait metilen karbonu (CH₂-Ar) 53,14 ppm'de; N-H'a bağlı metilen grubuna ait karbon (HN-CH₂) 49,39 ppm'de ve aromatik halkaya bağlı metil grubuna ait karbon (CH₃-Ar) 20,39 ppm'de gözlemlendi [27].



Şekil 4. L1 Bileşiğine ait ¹³C NMR spektrumu (¹³C NMR spectrum of Compound L1)

3.2. Bileşiklerin Sitotoksikite Analizleri (Cytotoxicity Analysis of Compounds)

Sentezlenen yeni bileşiklerin insan kolon kanseri hücre serileri üzerine etkileri Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterildi. Caco-2 hücrelerine uygulanan bileşiklerin 50 ve 100 µM dozları kontrol grubuna kıyasla canlılığı önemli düzeyde azalttı (p<0.05).

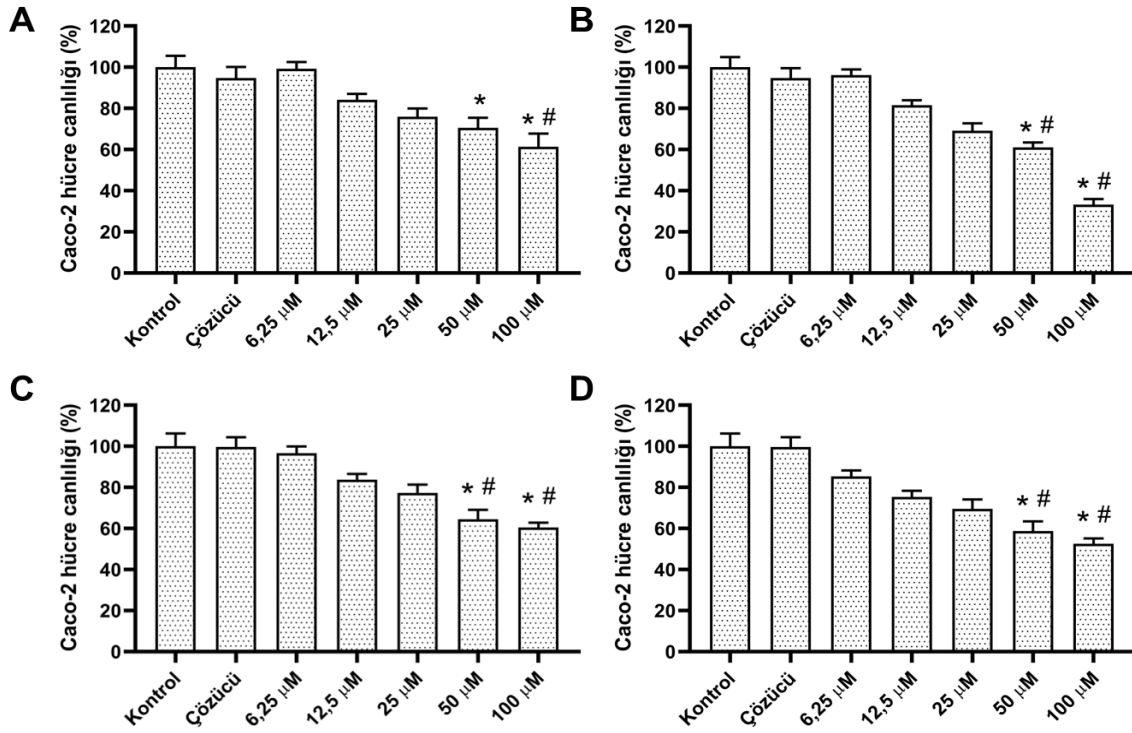
Dahası L2 ve L3 bileşiklerinin uygulanan bu dozlar çözücü grubuna kıyasla da güçlü sitotoksik etki sergiledi (p<0.05). Bileşiklerin HT-29 hücrelerine uygulanmasından sonra bu hücre serisi içinde Caco-2 hücre canlılığına benzer şekilde etkiler gözlemlendi. Bütün bileşiklerin uygulanan en yüksek dozu kontrole ve çözücü grubuna kıyasla canlılığı önemli düzeyde azalttı (p<0.05).

Tablo 4. Test edilen bileşiklerin LogIC₅₀ değerleri (µM) (LogIC₅₀ values (µM) of tested compounds)

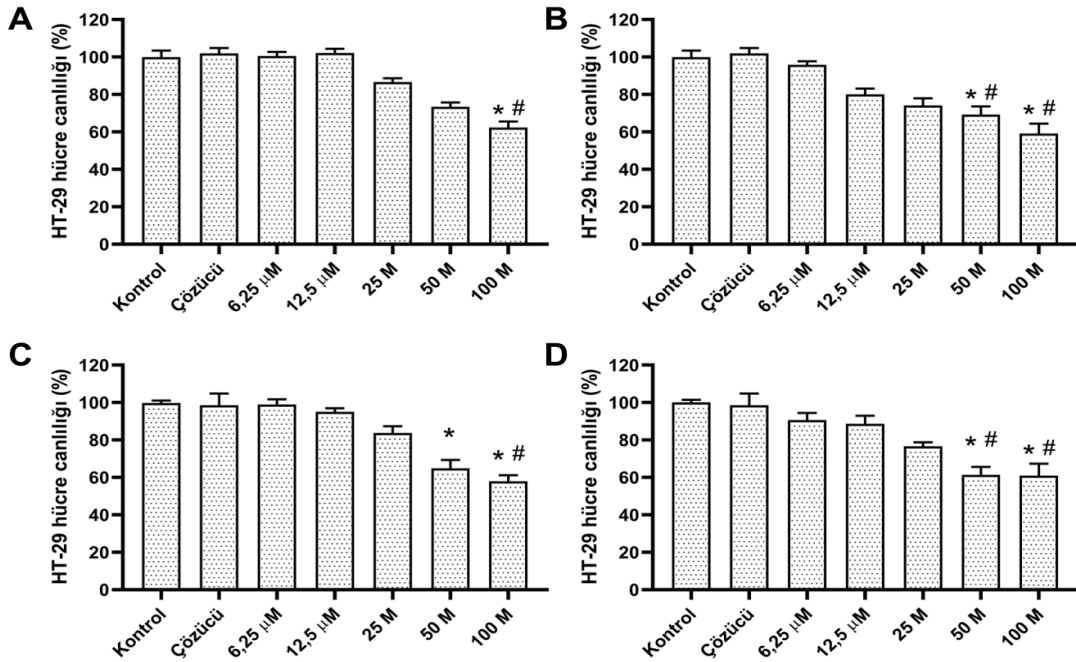
	Caco-2	HT-29
L1	1,29	1,51
L2	1,50	1,30
L3	1,31	1,46
5-FU	1,37	1,40

Her iki hücre serisi içinde bileşiklerin etkinliği standart kemoterapi ilacı 5-FU ile karşılaştırıldı. Sonuçlar 5-Fluorourasil'in (5-FU) 50 ve 100 μ M dozu Caco-2 hücrelerinde yaklaşık %50 civarında

hücre canlılığını azalttı. Bu oran HT-29 hücrelerinde yaklaşık %40 civarında görüldü. Tüm test bileşiklerinin LogIC₅₀ değeri hesaplandı ve Tablo 4'de sunuldu.



Şekil 5. Uygulamalardan 24 saat sonra Caco-2 hücre canlılığında meydana gelen değişimler. (A) L1, (B) L2, (C) L3 ve (D) 5-FU. * $p < 0.05$ kontrole kıyasla; # $p < 0.05$ çözücü grubuna kıyasla. (Changes in Caco-2 cell viability 24 hours after applications. (A) L1, (B) L2, (C) L3, and (D) 5-FU. * $p < 0.05$ compared to control; # $p < 0.05$ compared to the solvent group.)



Şekil 6. Uygulamalardan 24 saat sonra HT-29 hücre canlılığında meydana gelen değişimler. (A) L1, (B) L2, (C) L3 ve (D) 5-FU. * $p < 0.05$ kontrole kıyasla; # $p < 0.05$ çözücü grubuna kıyasla. (Changes in HT-29 cell viability 24 hours after applications. (A) L1, (B) L2, (C) L3, and (D) 5-FU. * $p < 0.05$ compared to control; # $p < 0.05$ compared to the solvent group.)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

N-Benziletildiamin ile 2-hidroksi-5-metilbenzaldehit, 2-hidroksi-5-metilasetofenon, 2-hidroksi-5-kloroasetofenon bileşiklerinin kondenzasyon reaksiyonu sonucunda 3 yeni Schiff bazı bileşiği sentezlendi (L1-L3). Sentezlenen bileşiklerin yapı analizi aşamasında ¹H NMR, ¹³C NMR ve FT-IR spektroskopik yöntemleri ile element analizi kullanıldı.

- Bileşiklerin ¹H NMR spektrum sonuçlarına göre her üç bileşikte bulunan aromatik halkaya bağlı hidroksil gruplarındaki protonlara ait (OH) sinyaller beklendiği gibi düşük alan bölgesinde 13,26 ppm-16,86 ppm arasında singlet pikler olarak gözlemlendi. Schiff bazlarında bulunan karakteristik azometin karbonuna bağlı proton (H-N=C) L1 bileşiğinde, 8,47 ppm'de gözlenirken, metil protonları (H₃C-N=C) L2 ve L3 bileşiklerinde sırasıyla 2,33 ppm ve 2,38 ppm'de sinyal verdi. L1-L3 bileşiklerinde etildiamin zincirinde bulunan NH protonları 3,33 ppm-3,75 ppm'de gözlenirken aromatik halka protonlarını 6,66 ppm-7,63 ppm aralığında integrasyon alanlarıyla uyumlu olarak sinyal verdi.
- L1-L3 bileşiklerinin FT-IR spektrumlarına göre, bütün bileşiklerin Schiff bazlarına özgü spesifik bantlara sahip olduğu belirlendi. L1-L3 bileşiklerinde sekonder amine ait NH gerilme titreşim bandı 3299 cm⁻¹ - 3373 cm⁻¹ aralığında, Schiff bazlarına özgü C=N gerilme titreşim bantları bileşiklerde 1660 cm⁻¹-1665 cm⁻¹ aralığında ve C-O gerilme titreşim bantları 1276 cm⁻¹-1281 cm⁻¹ aralığında gözlemlendi.
- Yapılan element analizi ise spektral verileri destekledi.

Schiff bazları ve metal kompleksleri, antikanser, antikonvülsan ve antioksidan gibi muazzam bir biyolojik aktivite potansiyeline sahip olan tıbbi bileşiklerin anahtar sınıfları olarak ortaya çıkmaktadır [29]. Yapılan çalışmalar bu bileşiklerin kanser terapisinde potansiyel kemoterapötikler olarak öne çıkabileceklerini bildirmektedir. Savcı vd. benzen-1,2-diamin ve 5-floropirimidin-2,4(1H,3H)-dion'un kondenzasyon reaksiyonundan Schiff bazı ligandı ve bu ligandın Fe(II), Co(II) ve Ni(II) komplekslerini sentezlemişlerdir. Araştırmacılar sentezlenen bileşiklerin MCF-7 (insan meme kanseri) ve L-929 (fibroblast) hücre hatları üzerine sitotoksik etkiler ortaya koyduğunu [30]. Diğer bir çalışmada Shi vd. sentezledikleri naftil grubu taşıyan Schiff bazların T-24 kolorektal

adenokarsinom hücrelerinde sitotoksik etki ortaya koyduğunu ve bu hücrelerin G2/M geçiş fazını doza bağlı bir şekilde azalttığını gösterdi. Buna ek olarak araştırmacılar T-24 hücrelerinde uygulamalar sonrası apoptotik hücre sayısında artışı rapor etmişlerdir [31].

- Çalışma sonuçları yeni sentezlenen Schiff bazı bileşiklerinin Caco-2 ve HT-29 kolon kanseri hücre serilerinde canlılığı önemli düzeyde inhibe ettiğini gösterdi.
- Bileşiklerin her iki hücre serisinde sergilediği sitotoksik etki standart kemoterapötik 5-FU'nun hücre serilerinde ortaya koyduğu sitotoksik etkiyle benzer seviyededir.
- Mevcut literatürler ve çalışma sonuçları yeni sentezlenen bileşiklerin kolon kanseri tedavisi için potansiyel ajanlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Yapılacak moleküler çalışmalar ve in vivo araştırmalar bu öngörünün gerçekleşmesi için gereklidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmanın istatistiksel analizi sürecinde desteklerinden dolayı Dr. Yavuz ERDEN'e teşekkür ederim.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makale kullanılan materyal ve yöntemler etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmemektedir.

The materials and methods used in this article do not require ethics committee permission and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Fatma HAMURCU: Deneyle yapılmış sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and wrote the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Patai S., Chemistry of the carbon-nitrogen double bond, John Wiley & Sons, NY, USA, 1970.
- [2] Abu-Dief A.M., Mohamed I.M.A., A review on versatile applications of transition metal complexes incorporating Schiff bases, Beni Suf Univ J Basic Appl Sci. 2015;4:(2)119-133.
- [3] Vigato P.A., Tamburini S., The challenge of cyclic and acyclic schiff bases and related derivatives, Coordination Chemistry Reviews. 2004;248:(17) 1717-2128.
- [4] More M.S., Joshi P.G., Mishra Y.K., Khanna P.K., Metal complexes driven from Schiff bases and semicarbazones for biomedical and allied applications: a review, Mater Today Chem. 2019; 14:100195.
- [5] Sharaby C.M., Amine M.F., Hamed A.A., Synthesis, structure characterization and biological activity of selected metal complexes of sulfonamide Schiff base as a primary ligand and some mixed ligand complexes with glycine as a secondary ligand, Journal of Molecular Structure. 2017; 1134: 208-216.
- [6] Roberts D.W., Schultz T.W., Api A.M., Skin Sensitization QMM for HRIPT NOEL Data: Aldehyde Schiff-Base Domain, Chemical research in toxicology. 2017; 30:(6) 1309-1316.
- [7] Redshaw C., Use of Metal Catalysts Bearing Schiff Base Macrocycles for the Ring Opening Polymerization (ROP) of Cyclic Esters, Catalysts. 2017;7:(5) 165.
- [8] R.J. DiRisio, Armstrong J.E., Frank M.A., Lake W.R., McNamara W.R., Cobalt Schiff-base complexes for electrocatalytic hydrogen generation, Dalton Transactions. 2017; 46:(31) 10418-10425.
- [9] Berhanu A.L., Gaurav, I. Mohiuddin, A.K. Malik, J.S. Aulakh, V. Kumar, K.H. Kim, A review of the applications of Schiff bases as optical chemical sensors, TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2019;116: 74-91.
- [10] da Silva C.M., da Silva D.L., Modolo L.V., Alves R.B., de Resende M.A., Martins C.V.B., de Fátima Â., Schiff bases: A short review of their antimicrobial activities, Journal of Advanced Research. 2011;2:(1) 1-8.
- [11] Müller I.M., Spillmann S., Franck H., Pietschnig R., Rational Design of the First Closed Coordination Capsule with Octahedral Outer Shape, Chemistry – A European Journal. 2004;10:(9): 2207-2213.
- [12] Abdel Aziz A.A., Seda S.H., Synthesis, structural features and biochemical activity assessment of N,N - bis - (2 - mercaptophenylimine) - 2,5 - thiophene dicarboxaldehyde Schiff base and its Co(II), Ni(II), Cu(II) and Zn(II) complexes, Applied Organometallic Chemistry. 2017;31: 3879.
- [13] Deswal Y., Asija S., Tufail A., Dubey A., Deswal, L. Kumar N., Gupta N.M., Instigating the in vitro antidiabetic activity of new tridentate Schiff base ligand appended M(II) complexes: From synthesis, structural characterization, quantum computational calculations to molecular docking, and molecular dynamics simulation studies Applied Organometallic Chemistry. 2023;37: (4) 7050.
- [14] Deswal Y., Asija S., Dubey A., Deswal L., Kumar D., Jindal D.K., Devi J., Cobalt(II), nickel(II), copper(II) and zinc(II) complexes of thiadiazole based Schiff base ligands: Synthesis, structural characterization, DFT, antidiabetic and molecular docking studies, Journal of Molecular Structure. 2022;1253: 132266.
- [15] Deswal Y., Asija S., Kumar D., Jindal D.K., Chandan G., Panwar V., Kumar N., Transition metal complexes of triazole-based bioactive ligands: synthesis, spectral characterization, antimicrobial, anticancer and molecular docking studies, Research on Chemical Intermediates. 2022; 48: 703-729.
- [16] Agarwal P., Asija S., Deswal Y., Kumar N., Recent advancements in the anticancer potentials of first row transition metal complexes Journal of the Indian Chemical Society. 2022;99: 100556.
- [17] Hajra S., Ghosh R., Chakrabarti S., Ghosh A., Dutta S., Dey T.K., Basu S., Rhodium-Catalyzed Enantioselective Conjugate Addition of Arylboronic Acids to Dihydroneitronaphthalenes, Advanced Synthesis & Catalysis. 2012; 354: 2433-2437.
- [18] Prakash A., Adhikari D., Application of Schiff bases and their metal complexes-A Review, International Journal of ChemTech Research. 2011; 3:(4) 1891-1896.
- [19] Krishnamoorthy P., Sathyadevi P., Muthiah P.T., Dharmaraj N., Nickel and cobalt complexes of benzoic acid (2-hydroxy-benzylidene)-hydrazide

- ligand: synthesis, structure and comparative in vitro evaluations of biological perspectives, RSC Advances. 2012; 2:(32) 12190-12203.
- [20] Alagesan M., Sathyadevi P., Krishnamoorthy P., Bhuvanesh N., Dharmaraj N., DMSO containing ruthenium (II) hydrazone complexes: in vitro evaluation of biomolecular interaction and anticancer activity, Dalton Transactions, 43(42) (2014) 15829-15840.
- [21] Aslam M.A.S., Mahmood S., Shahid M., Saeed A., Iqbal J., Synthesis, biological assay in vitro and molecular docking studies of new Schiff base derivatives as potential urease inhibitors, European Journal of Medicinal Chemistry. 2011; 46:(11): 5473-5479.
- [22] Liu Y.T., Sheng J., Yin D.W., Xin H., Yang X.M., Qiao Q.Y., Yang Z.J., Ferrocenyl chalcone-based Schiff bases and their metal complexes: Highly efficient, solvent-free synthesis, characterization, biological research, Journal of Organometallic Chemistry. 2018;856: 27-33.
- [23] Koeffler H.P., McCormick F., Denny C., Molecular mechanisms of cancer, The Western Journal of Medicine. 1991; 155:(5): 505-14.
- [24] Pereira C., Leão M., Soares J., Bessa C., Saraiva L., New Therapeutic Strategies for Cancer and Neurodegeneration Emerging from Yeast Cell-based Systems, Current Pharmaceutical Design. 2012; 18:(27):4223-4235.
- [25] Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I., Parkin D. M., Piñeros, M., Znaor A., Bray F., Cancer statistics for the year 2020: An overview, International Journal of Cancer, 2021;149: 778-789.
- [26] Feng S.S., Chien S., Chemotherapeutic engineering: application and further development of chemical engineering principles for chemotherapy of cancer and other diseases, Chemical Engineering Science. 2003;58: 4087-4114.
- [27] Sibel K. 2013. (New-Generation Metallocene Catalysts for Olefin Polymerization, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] Mosmann T., Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays, Journal of Immunological Methods. 1983; 65:55-63.
- [29] Tadele K.T., Tsega T.W., Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry. 2019; 19:(15):1786-1795.
- [30] Savcı A., Buldurun K., Alkış M.E., Alan Y., Turan N., Synthesis, characterization, antioxidant and anticancer activities of a new Schiff base and its M(II) complexes derived from 5-fluorouracil, Medical Oncology. 2022; 39: 172.
- [31] Shi S., Yu S., Quan L., Mansoor M., Chen Z., Hu H., Liu D., Liang Y., Liang F., Synthesis and antitumor activities of transition metal complexes of a bis-Schiff base of 2-hydroxy-1-naphthalenecarboxaldehyde, Journal of Inorganic Biochemistry. 2020;210 111173

Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD

Bilge İMER^{1*} 

¹Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/09/2023
Revision: 26/09/2023
Accepted: 26/09/2023

Keywords

Zinc oxide
ZnO
Atomic Layer Deposition
ALD
Electrical Properties
Point Defects

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/09/2023
Düzeltilme: 26/09/2023
Kabul: 26/09/2023

Anahtar Kelimeler

Çinko oksit
ZnO
Atomik Katman Büyütme
ALD
Elektriksel Özellikler
Noktasal kusurlar

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Structural and stoichiometric defects play a crucial role in determining the electrical properties of ZnO, and are strongly controlled by the growth method and conditions. In this study, the dynamics between structural and electrical properties for various ALD growth conditions were analyzed to identify the main contributors to n-type conductivity. / Yapısal ve stokiyometrik kusurlar, ZnO'nun elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu kusurlar ancak büyüme yöntemi ve koşulları ile kontrol edilebilir. Bu çalışmada çeşitli ALD büyüme koşulları için yapısal ve elektriksel özellikler arasında dinamikler, n-tipi iletkenliği etkileyen ana faktörleri belirlemek amacı ile analiz edildi.

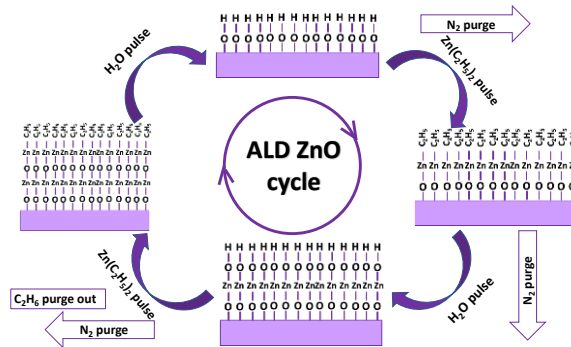


Figure A: Representation of ZnO growth cycle by ALD

/Şekil A: Temsili ALD ile ZnO büyüme döngüsü

Highlights (Önemli noktalar)

- Temperature and relative DEZ and DI pulse times were the strongest influencers of ZnO structural and ,hence, the electrical properties./Büyüme sıcaklığı ve göreceli DEZ&DI atış süreleri ZnO'nun yapısal ve dolayısıyla elektriksel özelliklerini en çok etkileyen büyüme faktörleridir.
- The contribution of hydrogen impurities, zinc interstitials and oxygen vacancies to resistivity values were observed experimentally./ Hidrojen safsızlıklarının, çinko arayerlerinin ve oksijen boşluklarının direnç değerlerine katkısı deneysel olarak gözlemlenmiştir.
- The strongest correlation was observed in between hydrogen impurity concentration and resistivity for various growth conditions./ En güçlü korelasyon, çeşitli büyüme koşulları için hidrojen safsızlık konsantrasyonu ile direnç arasında gözlemlendi.

Aim (Amaç): The main purpose of this study was to identify the specific defect/impurity contributors to n-type electrical conductivity in different growth conditions for ALD grown ZnO films. / Bu çalışmanın temel amacı, ALD ile büyütülmüş ZnO filmleri için farklı büyüme koşullarında n-tipi elektrik iletkenliğine katkıda bulunan spesifik kusurları/safsızlıkları tanımlamaktır.

Originality (Özgünlük): An experimental evidence is presented for defect/impurity concentration, especially hydrogen impurity, contribution to n-type conductivity in ZnO. / ZnO n-tipi iletkenliğine kusur ve safsızlıkların, özellikle hidrojen safsızlıklarının, katkı sağlayan mekanizma olduğunun kanıtı deneysel olarak sunulmuştur.

Results (Bulgular):

The contribution of hydrogen impurities, zinc interstitials and oxygen vacancies to conductivity was observed at different growth conditions. Lowest resistivity and highest average % transmittance were obtained as 6.8×10^{-3} ohm.cm and 92% in visible spectrum (380-700 nm), respectively.

Conclusion (Sonuç): Main defect/impurity contributors to n-type conductivity in ZnO were experimentally identified. / ZnO n-tipi iletkenliğine başlıca kusurların/safsızlıkların katkısı deneysel olarak ortaya konulmuştur.



Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD

Bilge İMER^{1*}

¹Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/09/2023
Revision: 26/09/2023
Accepted: 26/09/2023

Keywords

Zinc oxide
ZnO
Atomic Layer Deposition
ALD
Electrical Properties
Point Defects

Abstract

The mechanism behind n-type conductivity of undoped ZnO films are not understood well. One and two dimensional defects (grain boundaries, dislocations), and zero dimensional stoichiometric point defects (vacancies, self-interstitials and impurities) play a crucial role in determining the electrical properties of ZnO. All defect mechanisms are strongly controlled by the growth method and conditions. While it is more straightforward examining the one and two dimensional defects, measuring and unveiling the mechanism behind the zero dimensional point defect contribution and their sole effect on the electrical properties are challenging. This is why there has been controversial discussion of results among experimental and computational works relating physical and chemical properties of ZnO to sustainable electrical properties. In this study, to correlate the dynamics in between structural and electrical properties of ZnO grown by thermal atomic layer deposition (ALD); growth temperature, DEZ and DI water precursor pulse times, DEZ/DI water precursor pulse ratio, and N₂ purge time were varied. To obtain growth condition specific structural and electrical properties; XRD, AFM, profilometer, ellipsometry, XPS/CasaXPS, UV-VIS spectrometer, Hall-Effect measurements were utilized. Although, there was no strong correlation for oxygen vacancies, the contribution of hydrogen impurities, zinc interstitials and oxygen vacancies to conductivity was observed at different growth conditions. Lowest resistivity and highest average % transmittance were obtained as 6.8×10^{-3} ohm.cm and 92% in visible spectrum (380-700 nm), respectively.

Termal ALD ile Büyütülmüş ZnO İnce Filmlerin Yapısal ve Elektriksel Özellikleri Arasındaki Dinamikler

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/09/2023
Düzeltilme: 26/09/2023
Kabul: 26/09/2023

Anahtar Kelimeler

Çinko oksit
ZnO
Atomik Katman Büyütme
ALD
Elektriksel Özellikler
Noktasal kusurlar

Öz

Katkısız ZnO filmlerin n-tipi iletkenliğinin ardındaki mekanizma iyi anlaşılmamıştır. 1 ve 2 boyutlu kusurlar (tane sınırları, dislokasyonlar) ve 0 boyutlu stokiometrik nokta kusurları (boşluklar, kendi arayerleri ve safsızlıklar), ZnO'nun elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu kusur mekanizmaları büyüme yöntemi ve koşulları tarafından güçlü bir şekilde kontrol edilir. 1 ve 2 boyutlu kusurları karakterize etmek ve incelemek daha basit olsa da, 0 boyutlu nokta kusur katkısının arkasındaki mekanizmayı ve bunların elektriksel özellikler üzerindeki tek etkisini ölçmek ve ortaya çıkarmak zorlayıcıdır. ZnO'nun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile elektriksel özellikleri arasında ilişki kuran deneysel ve hesaplamalı çalışmalar arasında tartışmalı sonuçların bulunmasının nedeni de budur. Bu çalışmada, termal ALD ile büyütilen ZnO'nun yapısal ve elektriksel özellikleri arasındaki dinamikleri ilişkilendirmek amacıyla; büyüme sıcaklığı, DEZ ve DI öncü atım süreleri, DEZ/DI öncü atım oranı ve N₂ temizleme süresi değiştirildi. Büyüme durumuna özgü yapısal ve elektriksel özellikleri elde etmek için; XRD, AFM, profilometre, elipsometri, XPS/CasaXPS, UV-VIS spektrometresi, Hall-Effect ölçümlerinden yararlanılmıştır. Oksijen boşlukları için güçlü bir korelasyon olmamasına rağmen, farklı büyüme koşullarında hidrojen safsızlıklarının, çinko ara katmanlarının ve oksijen boşluklarının iletkenliğe katkısı gözlemlendi. Görünür spektrumda (380-700 nm) en yüksek ortalama % geçirgenlik %92 olarak ve en düşük özdirenç $6,8 \times 10^{-3}$ ohm.cm olarak elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, Al₂O₃, ZnO, SnO₂, ITO, AZO, FZO, FTO have been the most common metal oxides

studied and used for wide range of applications [1-5]. Among all, zinc oxide (ZnO) distinguishes itself from other metal oxides for being abundant, available, cheap and non-toxic. Also, its high

thermal conductivity [6], high electron mobility [7], high radiation hardness [8], direct and wide bandgap [9], high free-exciton binding energy [10], surface chemical reactivity, and large piezoelectric constants [11], makes it an ideal material choice for various applications.

ZnO is an innate n-type II-VI semiconductor material with covalent and ionic bonding characteristics. ZnO can exist in hexagonal wurtzite, zincblend and rocksalt crystal structure forms. While wurtzite structure is thermodynamically preferred at ambient conditions, it can be transformed into rocksalt structure under high pressure conditions. Metastable zincblend phase can be obtained when grown over zincblend substrates or it appears in wurtzite structure seperated by defects when grown over highly lattice mismatched substrates. [7] ZnO’s most stable crystal form, wurtzite, is the same as GaN, but, unlike GaN, ZnO is available in large bulk size single crystals [10]. However, due to uncontrollable electrical properties, the use of ZnO has been limited in semiconductor industry.

The similarity in between ZnO and GaN is not only limited by their crystal structures. ZnO (3.37 eV) has very similar direct wide bandgap as GaN (3.4 eV), except with larger exciton binding energy (60 meV for ZnO vs. 25 meV for GaN) yielding a more stable and higher emission efficiency at room temperature and above [12]. ZnO has been studied to complement GaN, providing substrate with its large available crystal size [13] and functional interlayers integrated in nitride device structures, or to substitute GaN’s function. Large exciton binding energies make ZnO a better candidate for UV/blue

light emitting applications (like LEDs and lasers). However, it has been a challenge to achieve p-type doping due to its high unintentional n-type innate doping characteristics originated mostly from its structural and point defects [14]. Due to its wide bandgap, ZnO is transparent to visible spectrum. Therefore, it can be utilized as transparent contact (TCO) to any light emitting devices (diodes and displays) [15-16], light collecting devices (like solar cells, detectors) [17], or to touch screens/energy saving windows. Another application area is its use in transistors [18-19] as conducting channel. Its high radiation hardness against MeV proton irradiation levels, makes ZnO a good candidate for space applications. Another property of ZnO is its spontaneous polarization along c-axis in wurtzite structure; this built-in field can be utilized in acoustic wave and piezoelectric devices [20-21].

Different methods like MOCVD [21], MBE [22], PLD [23], sputtering [24], ALD [5] have been employed to grow ZnO films. ALD has many advantages over the aforementioned alternative growth methods. Due to its low processing temperatures, large area uniformity and high conformal coverage, it is economical, applicable over low melting temperature materials like polymers and textile, and compatible with large area industrial applications and 3D device architectures; precise thickness control is achievable with atomically smooth interfaces; and it is easily integrable to other semiconductor processes.

Although, ZnO has many potential application areas, i) controlling and reproducibility of n-type ZnO’s electrical properties, and ii) achieving p-type

Table 1. Density functional calculations summary for defects and H impurities in n-type as grown

ZnO [25] (n-tipi ZnO filmlerde kusurlar ve H safsızlıkları yoğunluk fonksiyonel hesaplamaları özeti)

Defect/Impurity	Formation Energy	Defect Transition Level	Carrier Type	Notes type
V _O	Low	Deep	Donor	Acts as compensator in p type ZnO
V _{Zn}	Low	Deep	Acceptor	Acts as compensator in n type ZnO
O _i ^t	High	Neutral	NA	Oxygen interstitial in tetrahedral sites
O _i ^p	High	Deep	Acceptor	Oxygen interstitial in octahedral sites
Zn _i	Mid	Shallow	Donor	More stable in octahedral sites, diffuse out easily
O _{Zn}	High	Deep	Acceptor	Large off-site displacement, not many
Zn _O	Mid	Shallow	Donor	Large off-site displacement
H _i	Low	Shallow	Donor	Forms bond with ZnO as ZnOH Highly mobile, diffuse out easily
H _O	Low	Shallow	Donor	More stable than interstitial H

ZnO remain as a challenge. Therefore, understanding the role of defects/impurities, growth variables and material property dynamics are indispensable for creating reproducible and sustainable ZnO films for electronic applications.

Structural defects and stoichiometric point defects play a crucial role in determining the electrical properties of ZnO. The main stoichiometric point defects that is considered to exist in ZnO are: Zn vacancies (V_{Zn}), O vacancies (V_O), Zinc interstitials (Zn_i), Oxygen interstitials (O_i), Zinc antisites (Zn_o), Oxygen antisites (O_{Zn}), and substitutional or interstitial impurities like hydrogen or carbon. The summary of defects and impurities present in as grown ZnO is summarized in Table 1. If all of these defects were energetically favored to exist, V_O , Zn_i , Zn_o would act like a donor, and V_{Zn} , O_i and O_{Zn} act like an acceptor. Zn rich growth regime favors donors (V_O , Zn_i , Zn_o), and O rich growth conditions support the existence of acceptors (V_{Zn} , O_i and O_{Zn}). But not all these defects are energetically favored to exist. Even when they are favored to exist not all would participate in n- or p-type conductivity. Based on computational results from density functional theory (DFT) demonstrated; V_O and V_{Zn} are the lowest energy, Zn_i and Zn_o next highest, then lastly followed by O_i and O_{Zn} with highest formation energies [25].

Oxygen vacancies (V_O), with lowest formation energy, are expected to form readily. However, it was calculated these defects are deep state donors and can not add to n-type conductivity but they compensate p-type carriers. Zinc vacancies (V_{Zn}) has the lowest formation energy among all point defects, and they are deep state acceptors. Therefore, they only act like n-type compensator. Zinc interstitials (Zn_i) prefers the octahedral sites. They and zinc antisites (Zn_o) are shallow donors, can participate in n-type conduction event, however, have relatively higher formation energies and unstable. Oxygen interstitials (O_i) and antisites (O_{Zn}) are both inactive or deep acceptors and have the highest calculated formation energies. They do not exist in significant amount [26-30].

Theoretically, undoped ZnO exist as unintentionally n-type doped. Among all stoichiometric defects only Zn_i and V_O can be the reason for it. However, as mentioned, calculated V_O donor levels are deep, can not be ionized, and Zn_i have relatively high formation energies. Therefore, hydrogen (H) impurity was suggested to be the source for n-type

conductivity in ZnO. H behaves amphoteric in almost all semiconductors, i.e. acts as positive charge in p-type and as negative charge in n-type.. But based on density functional calculations, H acts as a shallow n-type donor in ZnO, and have a low formation energy. Also, H is the smallest atom in periodic table and can easily diffuse into ZnO lattice. In addition, H exist in all growth environments. Interstitial H binds to oxygen atom in ZnO forming $Zn(OH)_2$ [7, 31]. Experimental results do not always agree with the theoretical calculations. For example, with calculated formation energy of 3.9 eV for oxygen vacancies, the concentration of V_O is implied to be on the order of 10^8 cm^{-3} while the experimental value is in the range of 10^{17} to 10^{19} cm^{-3} . The debate on what contributes to ZnO n-type conductivity still exists. [32-35]

Either the H impurities or O vacancies, etc., all of the point defect/impurity presence can be strongly controlled by the growth type and growth conditions. To obtain reproducible conductivities for ZnO, the mechanism and its relation with structural property should be addressed well. Within the scope of this study, after relating processing conditions with ZnO's structural properties, the electrical properties are correlated with structural properties and growth variables to shed light on the n-type conductivity mechanism. A special attention was paid on analyzing the presence of mentioned defects and their correlation with resistivity.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1. Experimental Design (Deney Tasarımı)

Both (100) silicon and quartz were used as substrates to deposit ZnO films. Substrates were cleaned with acetone, isopropyl alcohol DI water in US bath prior to growth. Silicon substrates were dipped into HF:DI (1:10) to remove the natural oxide. ZnO films were deposited by OkyayTech thermal atomic layer deposition (ALD). Diethylzinc ($DEZ-Zn(C_2H_5)_2$, (Sigma Aldrich) was used as Zn precursor and deionized water (DI) was used as oxygen source. Both precursors were kept at room temperature. Nitrogen ($\geq 99.99\%$) was utilized as a carrier gas with 20 sccm flow rate. The chamber base pressure was kept at 640 μbar . The ZnO thin films were optimized by changing growth temperature (between 125- 200° C), DEZ and DI pulse times (as 15, 50, 100 ms) at DEZ/DI ratio of 1, DEZ/DI ratio (from 0.25 to 2), and nitrogen purge time (as 2, 5, and 10s) as summarized in Table 2.

Table 2. Experimental parameters (Deneysel parametreler)

Sample #	Temperature (°C)	Cycle	DEZ Pulse (ms)	DI Pulse (ms)	DEZ/DI Ratio	Purge time (s)
1	200	400	15	15	1	10
2	175	400	15	15	1	10
3	150	400	15	15	1	10
4	125	400	15	15	1	10
5	175	400	100	100	1	10
6	175	400	50	50	1	10
7	175	400	50	50	1	5
8	175	400	50	50	1	2
9	175	400	50	100	2	10
10	175	400	100	50	0.5	10
11	175	400	200	50	0.25	10

The number of ALD growth cycle was kept at 400 cycles for all growth conditions yielding 70-90 nm thickness variation for all conditions.

The process optimization parameters were set into four groups. The temperature variation was identified as **Group 1**; the variation in DEZ and DI pulse times was identified as **Group 2**; the change in purge time was named as **Group 3**; and the change in DEZ/DI ratio was identified as **Group 4**. Each group variable change was correlated with structural properties (thickness-growth rate, crystal quality, surface roughness, stoichiometry), and with electrical (resistivity, carrier density and mobility) and optically%transmittance in visible range to analyze the impact of various ALD growth conditions on potential electrical and optical application performance.

2.2. Characterization (Karakterizasyon)

dimensions. In Figure 2, the dimensions of the workpiece and tool, and the processing principle are shown. The experiments were carried out on the Furkan compact 1 Z-NC type die-sinking electro erosion bench. Belone EDM F liquid with high flash point and low viscosity was used as dielectric fluid.

The film thicknesses were determined using V-VASE spectroscopic ellipsometer and Dektak-8 surface profiler. Surface roughness values were measured utilizing Veeco MultiMode V atomic force microscopy (AFM) in tapping mode. The 2 θ scans in between 30-70° were taken with Rigaku Ultima IV X-ray Diffraction (XRD) (Cu-K α radiation with a wavelength of $\lambda= 1.5406 \text{ \AA}$) operated at 40 kV and 40 mA. The electrical and optical characterizations were carried out with

samples grown on quartz substrates; structural characterization were done on silicon substrates. The transmission values of all samples were analyzed with Cary 100 UV-VIS Spectrometer in between 300-700 nm wavelength range. ZnO stoichiometry and binding energies were measured with Phi5000 Versa Probe X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). CasaXPS software was used to analyze binding energies. The resistivity, carrier density and mobility values were characterized by ECOPIA HMS-3000 Hall Effect system using Van der Pauw patterns. All characterizations were carried out at room temperature.

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Structural and Chemical Properties (Yapısal ve Kimyasal Özellikler)

Thickness, Growth Rate and Surface Properties

(Kalınlık, büyüme hızı ve yüzey özellikleri)

There is an optimum growth window in which the surface is saturated and all precursors used effectively to obtain a better quality film [36-40]. As summarized in Table 3, growth rates on Si substrate (2-2.31 Å/cycle) were higher than growth rates on quartz substrates (1.6-2.1 Å/cycle) due to higher thermal conductivity of Si substrates. A better fit was obtained with the ellipsometry measurements for the thickness values taken from ZnO films with underlying quartz substrates, therefore, growth rate discussions can be carried over the quartz substrate data. With increasing growth temperature, the growth rate on quartz substrates reaches to maximum value of 2.84 Å/cycle at 175°C, as the ethyl ligands were effectively removed by water with increasing temperature, then it starts to drop

again with increased desorption rates. Therefore, structural and chemical properties this window will be utilized for further analysis. ALD growth window for ZnO was determined to be approximately 140°C-180°C. When discussing

Table 3. Summary of thickness, growth rate and surface roughness values (Kalınlık, büyüme hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin özeti)

	Sample #	Variable sets	Variable	Surface Roughness (Rms) for 1 μm^2 area (nm)	Thickness over Si (nm)	Growth Rate over Si (Å/cycle)	Thickness over Quartz (nm)	Growth Rate over Quartz (Å/cycle)
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	2.62	84	2.1	73.61	1.84
	2		175°C	1.4	92.3	2.31	75.27	1.88
	3		150°C	1.82	85.9	2.15	73.45	1.84
	4		125°C	2.87	79.8	2	64.3	1.6
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	1.91	85.4	2.13	78.08	2
	6		50 ms	1.66	85.9	2.22	78.01	2
	2		15 ms	1.4	92.3	2.31	75.27	1.88
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	1.66	85.9	2.22	78.01	2
	7		5 s	1.95	89	2.22	80	2
	8		2 s	2.82	85	2.12	82.1	2.1
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	1.8	90.26	2.25	79.75	2
	5		1	1.91	85.4	2.13	78.08	2
	10		0.5	2.29	82.38	2.06	78.78	1.97
	11		0.25	2.73	87.24	2.18	78.65	1.97

Table 4. Summary of XRD results for (100) and (002) peaks, and calculated average grain size for (100) and (200) reflections ((100) ve (002) pikleri XRD sonuçları ve (100) ve (002) pikleri için hesaplanmış ortalama tane bütüklükleri)

	Sample #	Variable sets	Variable	Surface Roughness (Rms) for 1 μm^2 area (nm)	Thickness over Si (nm)	Growth Rate over Si (Å/cycle)	Thickness over Quartz (nm)	Growth Rate over Quartz (Å/cycle)
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	2.62	84	2.1	73.61	1.84
	2		175°C	1.4	92.3	2.31	75.27	1.88
	3		150°C	1.82	85.9	2.15	73.45	1.84
	4		125°C	2.87	79.8	2	64.3	1.6
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	1.91	85.4	2.13	78.08	2
	6		50 ms	1.66	85.9	2.15	78.01	2
	2		15 ms	1.4	92.3	2.31	75.27	1.88
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	1.66	85.9	2.15	78.01	1.95
	7		5 s	1.95	89	2.22	80	2
	8		2 s	2.82	85	2.12	82.1	2.1
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	1.8	90.26	2.25	79.75	2
	5		1	1.91	85.4	2.13	78.08	1.95
	10		0.5	2.29	82.38	2.06	78.78	1.97
	11		0.25	2.73	82.24	2.05	78.65	1.97

As expected, the growth rate was stabilized at 2 Å/cycle for varying precursors pulse time lengths after 50 ms. For shorter pulse times, it is most likely that the surface saturation time was not sufficient. The purge time did not have any observable influence on the growth rate, just an insignificant drop most likely due to desorption of species under

longer purge times. Meanwhile for DEZ/DI pulse time ratio of 1 and above, the maximum growth rate was achieved and stabilized at 2 Å/cycle. For lower DEZ/DI pulse time ratio the growth rate was lower due to insufficient DEZ pulse duration. Surface roughness rms values were in the range of 1.4-2.87 nm for 1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ area. As will be discussed in

detail along with XRD results in the “Crystallinity” section, the surface roughness is a strong function of the surface precursor dynamics and growth modes (the preferred polycrystalline orientations).

Crystallinity (*Kristalinite*)

The final film quality is determined by the surface reaction dynamics and these reaction dynamics are highly growth temperature dependent. For ALD ZnO growth utilizing DEZ and DI water, there are 3 growth zones:

Zone 1: Up to around 120°C. The temperature is not high enough to get over the energy barrier to remove the ethyl-ligands with water, monoethyl zinc (MEZ) groups supersaturates the surface. Ligands prefer to attach to lowest energy surface sites, which is (002) [41]. So (002) oriented growth dominates other orientations. The ethyl ligands persists on the surface so the growth rate is low, but it increases with increasing temperature.

Zone 2: Around 120°C to around 180°C. This is the so-called ALD growth window. The growth rate becomes constant at self-limiting rate. (002) peaks are suppressed and (001) are mixed more dominantly. Due to built-in polarity of ZnO wurtzite crystal along $\langle 0001 \rangle$, (002) surface can be charged positively when Zn atoms terminated and charged negatively when O atoms terminated after each cycle [39]. These highly charged surfaces are not favored for ligand exchanges suppressing (002) oriented growth and enhancing (001) oriented growth. The prematurely dissociated ethyl anion fragments saturates (002) positive Zn polar surfaces and suppresses its growth, while (100) orientation growth relatively enhanced.

Zone 3: Above 180°C. The reactants either desorbs from the surface (mainly DEZn). Growth rate decreases with increasing temperature. The positive or negative anions saturating (002) polar surfaces and suppressing its growth, break down further creating a charge neutral surface, not blocking (002) growth anymore. Therefore enhancing (002) oriented growth along c-axis. The more Zn rich (oxygen deficient) growth higher the stability of (002) orientation.

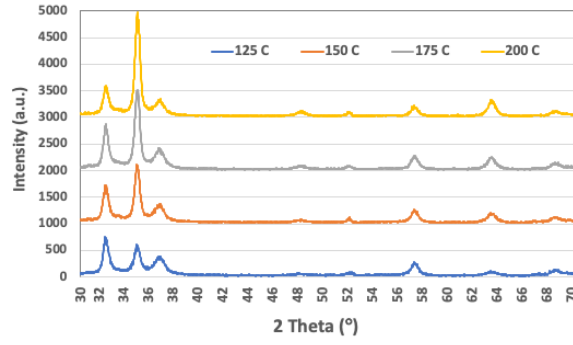
Due to growth temperature range (125°C-200°C) used in experiment sets, the growth mechanisms are Zone 2 and Zone 3 dominated. Based on XRD, AFM and ellipsometry results the zone ranges are determined to understand the surface reaction

dynamics leading to specific defect/impurity composition and finally related to electrical properties. Table 4 summarizes the XRD (100) and (200) orientation results for different growth variable sets. From these XRD results, average grain sizes for (100) and (002) orientations were calculated utilizing Debye Scherrer relation.

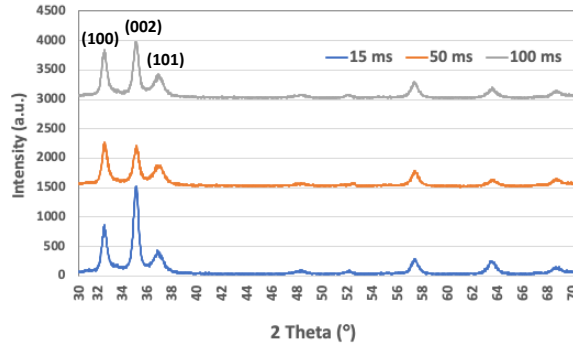
In Figure 1, 2θ scans show the preferred orientations of polycrystalline ZnO films. The first peak at 31.8° belongs to (100) plane perpendicular to nonpolar orientation of ZnO wurtzite cell, the second peak is the (002) plane perpendicular to main c-axis polar orientation at around 34.7°. These are the main peaks that demonstrates the preferred growth orientation of ZnO films based on growth conditions. ZnO polycrystals have mixed orientations of (100) and (002). Relative amounts of each orientation is determined based on relative peak intensities and FWHM values.

As can be seen on Figure 1.a, With increasing growth temperature, (002) peak dominates (100) peak. The growth orientation (002) is preferred due to altered surface dynamics forming Zn rich ZnO films with increased growth temperature.

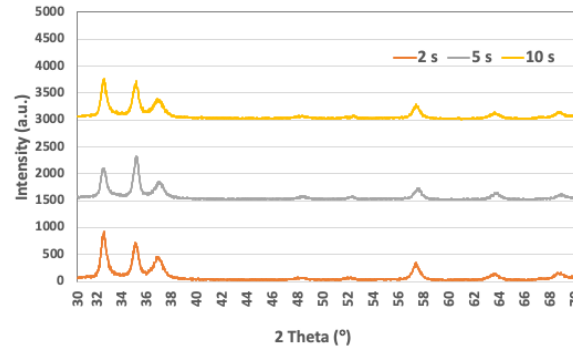
Growth temperature is the most important parameter determining the final film quality and preferred crystal orientation as described Zone 1, 2 and 3. So, in tune with XRD data, at 125°C (001) orientation was preferred, while still some (002) crystallites were aligned along c-[0001] growth direction. In Figure 2.a AFM topography image, it is possible to see fewer columnar grains aligned along growth direction. These irregular (002) plane undulations in combined with (100) plane growth creates relatively rougher surface. As temperature increases to 200°C, c-[0001] direction growth perpendicular to (002) planes dominates more, creating a balanced mixture between (100) and (002) planes. As a result, the surface roughness values diminishes as the temperature goes up to 175°C. Above 175°C, the surface species starts to desorb creating relatively rougher surface. The AFM surface topography images show the granular surface nature due to columnar growth in preferred direction. At 125°C the surface roughness is the highest (2.87 nm), and decreases to 1.82 nm at 150°C and to 1.4 nm at 175°C as bimodal orientation distribution averages out to smoother surface features. Then at 200°C, surface desorption dynamics caused 2.62 nm surface roughness valu



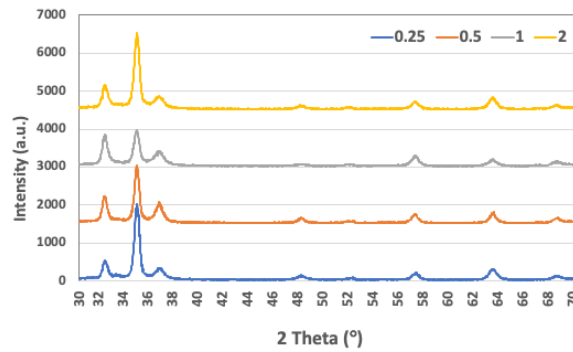
a)



b)



c)



d)

Figure 1. XRD spectrum of ZnO films for changing: **a)**growth temperature (Group 1), **b)**DEZ and DI pulse times for constant DEZ/DI ratio of 1 (Group 2), **c)**nitrogen purge time (Group 3), and **d)**DEZ/DI ratio (Group 4). (Representative peak positions are given in **b)**)(ZnO filmlerin XRD spektrumları a) büyüme sıcaklığı, b) DEZ ve DI atım süreleri, c) nitrojen temizleme süresi, ve d) DEZ/DI oranına göre)

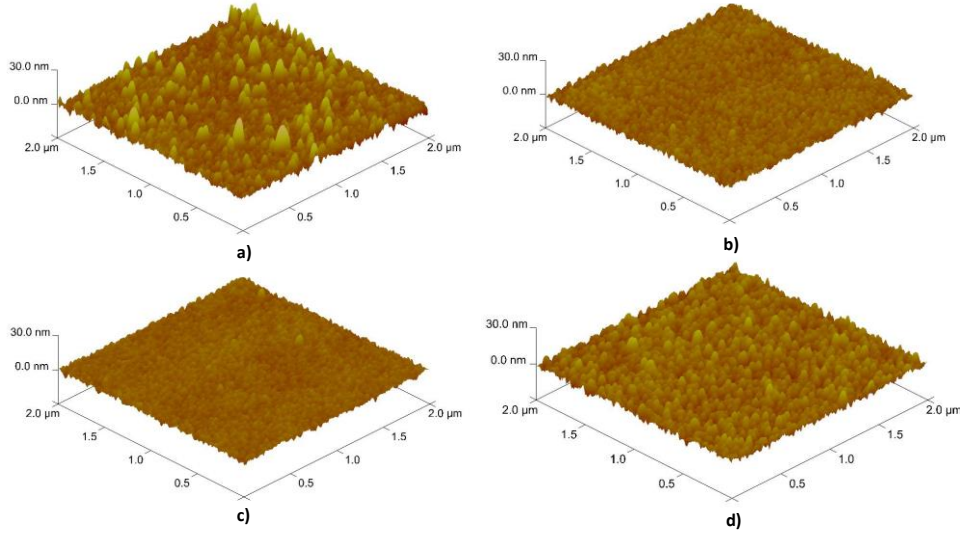


Figure 2. AFM scans of ZnO films at various temperatures; rms values: a) 125°C; 2.87 nm , b) 150°C; 1.82 nm, c)175°C; 1.4 nm, and d) 200°C; 2.62 nm. (ZnO filmleri AFM taraması pürüzlülük değerleri)

To find the size of the (100) and (002) grains, observed in XRD patterns and AFM images, the technique of X-ray line broadening was utilized. The Debye Scherrer equation $D(2\theta)=K\lambda/\beta\cdot\cos\theta$ was used to calculate the average grain sizes for (100) and (002) crystallites. Where D being the grain size, θ is the diffraction angle, λ the X-ray wavelength ($\lambda= 1.5406 \text{ \AA}$), K represents the Scherrer constant (0.98) and β denotes the full width

at half max (FWHM) in radians. The crystallite sizes varied between 15-18 nm for (100) and 13-20 nm for (002) orientations depending on the growth condition. These values are in agreement with values obtained in literature [44]. As can be seen in Figure 3.c, with increase in temperature, both (100) and (002) crystallites grow larger. The (002) crystallites grow with higher rate due to high-temperature preferred Zn-rich growth mode

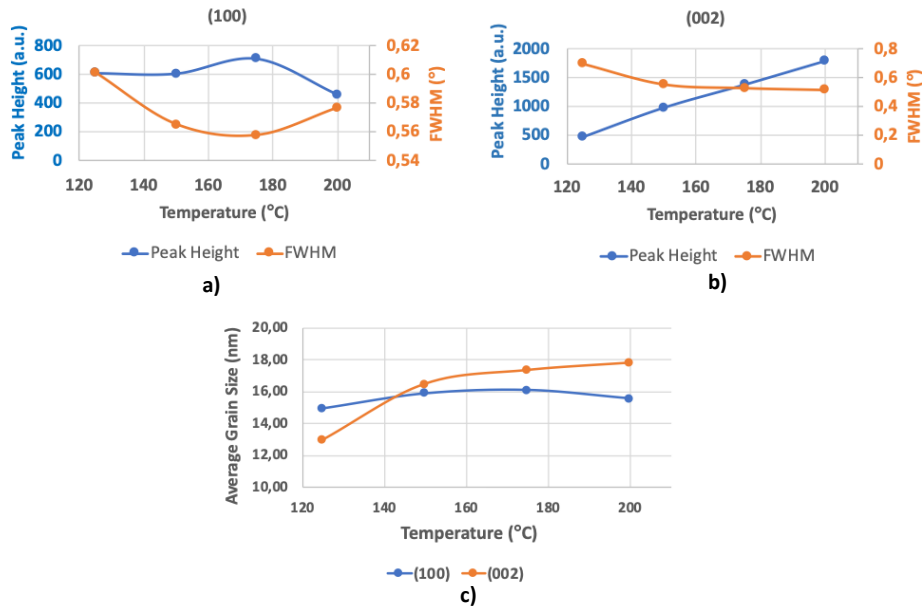


Figure 3. Effect of temperature on: **a)**(100) peak height and FWHM, **b)** (002) peak height and FWHM, and, **c)**(100) and (200) orientation grain size (Sıcaklığın a) (100) pik yüksekliğine ve FWHM'e, b) (002) pik yüksekliğine ve FWHM'e, c) (100) ve (200) oryantasyonunda tane büyüklüğüne etkisi)

To analyze the XRD and AFM results further, it is important to understand the surface reaction, adsorption and desorption dynamics well. When DEZ is pulsed on to a hydroxylated surface (with -OH group), one of the ethyl groups in DEZ takes the H atom from -OH group and purged out as ethane. This process leaves a surface oxygen attached to monoethyl zinc ligand (MEZ), the process followed with nitrogen purge and DI water pulse maintains the ALD growth cycle. Single MEZ-water exchange is low barrier (exothermic), however, MEZ saturated surface have a high ethyl-water exchange

barrier. Therefore, adsorption of water with high MEZ covered Zn surface is inhibited by steric effect, so the growth favors (100). Some ethyl groups stay on surface even after DI water purge. Sufficiently long purge times and long DI water pulse times relative to DEZ pulse times creates higher ZnO formation, better stoichiometry and better surface features due to removal of ethyl ligands helping (002) growth. Similarly, short DI water purge leads to (100), and short DEZ pulse times favor (100) growth [42-43,31].

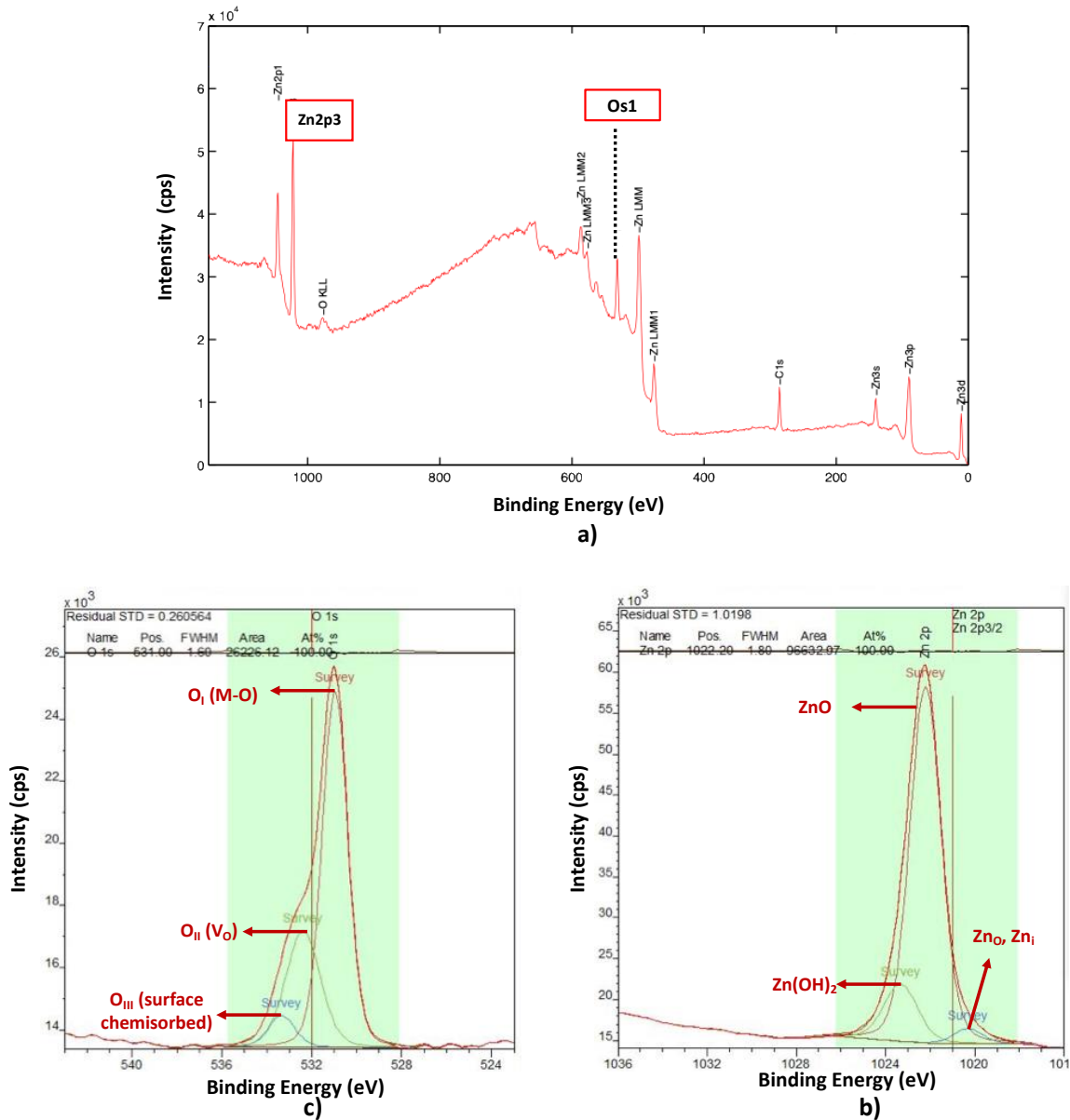


Figure 4. a) Representative XPS result for ZnO films, b) screenshot of CasaXPS analysis for O1s peak integrated binding energies distribution, and c) screenshot of CasaXPS analysis for Zn2p3/2 peak integrated binding energies distribution (a)ZnO filmler için temsili XPS sonucu, b) entegre bağlanma enerjileri dağılımından oluşan O1s pikinin CasaXPS analizi , c) entegre bağlanma enerjileri dağılımından oluşan Zn2p3/2 pikinin CasaXPS analizi)

As the DEZ and DI water pulse times increase (Group 2), surface roughness increases, and for increasing nitrogen purge times (Group 3), surface roughness decreases with a common reason: due to removal of ethyl ligands surface gets more saturated creating better stoichiometry ZnO formation with better surface features. Based on XRD scans, for Group 2, no significant change in (100) and (002) growth preference was observed for increasing purge time. And for the increasing DEZ/DI ratio (Group 4), XRD data shows (002) gets less intense up to ratio of 1 then the domination switches back to (002) crystallite formation. This trend is very similar to what was observed when increasing growth temperature (Group 1). The crystallites starts of with O-rich (100) orientation and it slowly switches back to Zn-rich (002) orientation. The decrease in surface roughness with increasing DEZ/DI ratio values also followed the same trend.

Stoichiometry: Point Defects and Impurities
(*Stokiyometri: Noktasal kusurlar ve safsızlıklar*)

O1s and Zn2p3/2 peaks were identified by XPS scan (Fig. 4.a). Each peak is composed of three Gaussian distribution revealing an information about the presence of each element (Zn or O) at different position and states. Using CasaXPS software each of these three distributions were identified. Accordingly, as depicted in Figure 4.b, O1s was composed of O_I (centered at 530.5 eV) representing oxygen binded with metal (Zn), O_{II} (centered at 531.8 eV) representing oxygen deficiencies, and O_{III} (centered at 532.8 eV) representing oxygen chemisorbed on the surface with other species such as H₂O, O₂, CO₃, Zn(OH)₂ [26, 49, 50]. For Zn2p3/2 peak, as shown in Figure 4.c, the distribution centered around 1021.4 eV represents Zn metal (either interstitial or antisite, more likely being the interstitial due to lower formation energy), the state centered around 1022.3 eV representing ZnO, and the peak centered around 1023.2 eV belonging to Zn(OH)₂ [51, 52]. As an n-type conductivity mechanism oxygen vacancies, zinc interstitials and hydrogen impurities were considered as the probable n-type carriers. The relative formation energies, ionization energies and diffusion barriers were discussed previously in introduction. Therefore, ZnO (O_I) and oxygen vacancy-V_O (O_{II}) distributions were taken into consideration for electrical property analysis. O_{III} distribution was disregarded, as the peak represents more than one species (H₂O, O₂, CO₃, Zn(OH)₂) chemisorbed with hydrogen mostly on the surface. For Zn2p3/2 XPS peak, ZnO distribution, Zn(OH)₂

distribution (as representative of hydrogen carriers), and Zn metal distribution (as representative of zinc interstitials) were counted in the electrical analysis. All point defects and impurities (V_O, H, Zn_i) distributions were normalized with respect to measured ZnO distribution. The summary of % binding energy distribution of ZnO defects/impurities based on CasaXPS analysis is given in Table 5. The normalized oxygen vacancy area distribution from O1s, Zn(OH)₂ and Zn_i area distribution from Zn2p3/2 with respect to each ZnO area distribution are also given in the same table.

The dominant n-type carrier defects for Zn-rich ZnO films are oxygen vacancies and zinc interstitials. Oxygen vacancy concentration (V_O/ZnO) was increased, as the stoichiometry shifted toward zinc rich phase with increasing temperature. The Zn_i/ZnO ratio was much higher at 175°C compared to rest of the temperatures. The reason for Zn_i/ZnO ratio getting a sharp decrease at 200°C, has to do with interstitial Zn atoms diffusing out easily as the temperature gets higher. There was no significant effect of DEZn and DI water pulse times and of DEZn/DI ratio on V_O/ZnO. The V_O/ZnO was increased as the unreacted surface ligands pushed away and surface desorption rate increases with the increased purge time. The trends in Z_i was affected with growth dynamics that saturates stoichiometric Zn. As the Zn sites were saturated with O more, Zn_i formed less. In terms of hydrogen incorporation into the film, Zn(OH)₂/ZnO ratio did not change significantly with change in temperature. Increase in DEZn and DI water pulse times Zn(OH)₂/ZnO ratio, having more hydrogen incorporated in to film with increasing precursor pulse times due to increased rate of zinc oxygen combination. The more oxygen incorporated into films more hydrogen will be able to make bond with them. This is the same reason why Zn(OH)₂/ZnO ratio gets higher as the temperature is increased up to 175°C, but above this temperature oxygen will start to desorb from surface leaving less number of oxygen atoms to bond with hydrogen. Similar relationship discussion can be extended to increased DEZ/DI water ratio. Having these defects/impurities chemically incorporated into ZnO films does not necessarily mean that they are participating in the n-type conductivity. To figure out their role in conductivity, the normalized Hall resistivity values will be correlated with the physical presence of these defects/impurities to find a direct evidence.

Table 5. The % distribution of ZnO defects/impurities based on their binding energy levels calculated by CasaXPS from XPS measurements (XPS ölçümlerine dayanarak CasaXPS ile hesaplanan ZnO kusurları/safsızlıkları bağlanma enerjileri % dağılımı)

	Sample #	Variable sets	Variable	O _i area (M-O) (%)	O _{ii} area (V _o) (%)	V _o /ZnO ratio	O _{iii} area (surface chemisorbed) (%)	ZnO area (%)	Zn(OH) ₂ area (%)	Zn(OH) ₂ /ZnO ratio	Zn (Zn _{i,o}) metal area (%)	Zn _{i,o} /ZnO ratio
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	55.7	30.83	0.55	13.47	87.06	12.14	0.14	0.79	0.01
	2		175°C	65.7	32.11	0.49	2.19	80.67	10.2	0.13	9.14	0.11
	3		150°C	62.16	31.97	0.51	5.86	80.33	13.49	0.17	6.18	0.08
	4		125°C	57.5	26.81	0.47	15.69	85.07	11.44	0.13	3.49	0.04
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	65.19	28.7	0.44	6.11	77.7	21.15	0.27	1.15	0.01
	6		50 ms	65.09	28.85	0.44	6.06	82.38	14.48	0.18	3.14	0.04
	2		15 ms	65.7	32.11	0.49	2.19	80.67	10.2	0.13	9.14	0.11
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	65.09	28.85	0.44	6.06	82.38	14.48	0.18	3.14	0.04
	7		5 s	57.79	32.91	0.57	9.3	76.94	20.83	0.27	2.24	0.03
	8		2 s	63.83	29.97	0.47	6.2	84.13	14.85	0.18	1.02	0.01
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	61.19	33.39	0.55	5.42	84.4	11.58	0.14	4.03	0.05
	5		1	65.19	28.7	0.44	6.11	77.7	21.15	0.27	1.15	0.01
	10		0.5	65.46	28.14	0.43	6.4	80.15	15.53	0.19	4.32	0.05
	11		0.25	65.56	28.73	0.44	5.71	79.13	15.05	0.19	5.81	0.07

Table 6. Summary of Hall measurement data and average % transmittance in the visible spectrum (380-700 nm) results (Hall ölçümü ve görünür bölgede ortalama % geçirgenlik değerleri)

	Sample #	Variable sets	Variable	Average Transmittance in Visible Range (380-700 nm)	Thickness on Quartz (nm)	Hall Resistivity (ohm.cm)	Carrier Density (/cm ³)	Mobility (cm ² /V.s)
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	74.3	73.61	0.047	1.23x10 ¹⁹	10.82
	2		175°C	82.1	75.27	0.0074	3.43x10 ¹⁹	24.5
	3		150°C	78.8	73.45	0.059	1.23x10 ¹⁹	8.63
	4		125°C	75.6	64.3	NA	9.15x10 ¹³	NA
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	86.5	78.08	0.0075	3.43x10 ¹⁹	24.4
	6		50 ms	90	78.01	0.0068	4.79x10 ¹⁹	19.17
	2		15 ms	82.1	75.27	0.0074	3.43x10 ¹⁹	24.5
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	90	78.01	0.0068	4.79x10 ¹⁹	19.17
	7		5 s	92.3	80	0.0075	3.43x10 ¹⁹	24.5
	8		2 s	82.1	82.1	0.0254	8.08x10 ¹⁹	3.05
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	89	79.75	0.0112	2.89x10 ¹⁹	19.24
	5		1	86.5	78.08	0.0075	3.43x10 ¹⁹	24.4
	10		0.5	79.8	78.78	0.0152	1.88x10 ¹⁹	21.76
	11		0.25	76.3	78.65	0.0266	2.06x10 ¹⁹	11.39

3.2. Electrical Properties (Elektriksel özellikler)

The summary of Hall measurements (Hall resistivity, carrier concentration and mobility) taken from ZnO films on quartz substrates utilizing Van der Pauw pattern at room temperature; thickness of ZnO films on quartz substrate; and average % transmittance measured in visible spectrum (380-700 nm) are given in Table 6. The c-[0001] direction

grown polar (002) planes have higher bandgap (3.37 eV) than perpendicular non-polar (001) planes, and it contributes to conductivity more than (001) planes.

Mobility and carrier densities increased and so the resistivity values decreased with increase in growth temperature. DEZ and DI water pulse times, varying nitrogen pulse times did not affect the resistivity

values substantially. The lowest resistivity value was obtained at 175°C as 0.0074 ohm.cm. Resistivities were lowest at all purge times, DEZ/DI ratio of 1, and all DEZ and DI water pulse times. The carrier densities ranged in between $1-8 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, and the mobility values were 3-24.5 cm^2/Vs . These carrier density, mobility and resistivity values are compatible with highest literature values [53,54].

Electrical Property-Structural Property Dynamics (Elektriksel özellik-yapısal özellik dinamikleri)

The effect of zero dimensional defect/impurity concentrations on resistivity values were investigated to see which candidate defect/impurity makes contribution to n-type conduction. The physical presence of these defects/impurities were

measured by XPS and analyzed with CasaXPS. However, if their ionization energies are high or if they are compensated, there would not be any contribution to conductivity.

All defect types (including grain boundaries, dislocations) and impurities are the factors affecting the resistivity values. Grain boundaries act like scattering centers for free carriers. These boundaries are also the source of dislocations and accumulation centers for n-type ZnO compensator zinc vacancies. So there is a strong correlation in between the size of the grains and resistivity. Zinc vacancies concentration increases with increase in grain boundary area, so increase in resistivity with grain size reduction is observed for all experiment groups.

Table 7. The summary of relative amounts of normalized ZnO defects, weighted average grain size of (100) and (002) peaks, and their effect on normalized resistivity data (ZnO kusurlarının, (100) ve (002) tanelerinin ağırlıklı ortalaması alınan tane boyutunun ve öz direncin normalize edilmiş değerleri)

	Sample #	Variable sets	Variable	V_o/ZnO ratio	$\text{Zn}(\text{OH})_2/\text{ZnO}$ ratio	$\text{Zn}_{i,o}/\text{ZnO}$ ratio	Weighted average grain size (nm)	Normalized resistivity
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	0.55	0.14	0.01	17.36	0.8158
	2		175°C	0.49	0.13	0.11	16.94	0.1254
	3		150°C	0.51	0.17	0.08	16.27	0.9601
	4		125°C	0.47	0.13	0.04	14.13	NA
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	0.44	0.27	0.01	16.54	0.1241
	6		50 ms	0.44	0.18	0.04	14.66	0.0997
	2		15 ms	0.49	0.13	0.11	16.94	0.1254
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	0.44	0.18	0.04	14.66	0.0997
	7		5 s	0.57	0.27	0.03	15.48	0.1161
	8		2 s	0.47	0.18	0.01	15.19	0.3859
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	0.55	0.14	0.05	18.18	0.2036
	5		1	0.44	0.27	0.01	16.54	0.1241
	10		0.5	0.43	0.19	0.05	17.08	0.2596
	11		0.25	0.44	0.19	0.07	19.15	0.5094

The average crystallite sizes can be correlated to change in electrical behaviour for polycrystalline ZnO films due to the grain boundary scattering and dislocation effect on free carriers. The crystallite size also can be related with dislocation density [45-48], as the dislocations are located on the grain boundaries. Smaller the grains larger the grain boundaries, so higher number of dislocations. Therefore, the calculated average grain sizes for (100) and (002) crystallites were utilized in combination with (100) and (002) relative XRD peak intensities to obtain a weighted average grain

size (WAGS) of ZnO films for each growth condition. Therefore, to single out the effect of grain boundary potential barrier effect on resistivity values, all Hall resistivity values were normalized with respect to the calculated WAGS. Mathematically, these WAGS values were multiplied by Hall resistivity values to obtain normalized resistivity values. So that an analysis in between point defects/impurities and resistivity can be carried out while ruling out the other defect effects.

The values obtained as a result of these calculations are presented in Table 7. The change in each specific candidate defect/impurity level and normalized resistivity values were plotted against each varying growth condition in Figure 5 (for Group 1), Figure 6 (for Group 2), Figure 7 (for Group 3) and Figure 8 (Group 4). To have a certain defect contribution, the evidence should suggest inverse relationship between the change in certain defect/impurity type concentration versus resistivity, i.e. if a certain defect concentration increases, the resistivity values should decrease with it. Although, there was no strong correlation for oxygen vacancies, the contribution of hydrogen impurities, zinc interstitials and oxygen vacancies to conductivity was observed at different growth conditions. The data sets that were a direct evidence of inverse relationship between the changes in defect/impurity concentration and resistivity are: Zn interstitial at varying temperatures, OH/ZnO (hydrogen impurity) at varying DEZn/DI water ratio, and all types of defect/impurities when purge time was varied, especially up to 5 seconds.

Playing with DEZn/DI ratio to obtain a balanced ZnO stoichiometry at sufficiently long purge times

(more than 5 second) and sufficiently high growth temperatures in ALD growth window yields hydrogen carrier dominated lowest resistivity values. Figure 6 suggests, to obtain a meaningful relationship between resistivity and defect/impurity contributions, DEZn and DI water pulse times should be at least 50 ms and more. The surface saturation can be accomplished at sufficiently long pulse times.

Zinc interstitial contribution to conductivity at changing growth temperatures was observed. As the temperature increased ZnO films gets Zn rich and some of the Zn atoms takes the interstitial sites, known to be a shallow donor. The number of Zn interstitials increase up to 175°C, then decreases dramatically at 200°C. Most likely increased chances of Zn atoms diffusing out of interstitial sites. The dramatic decrease in Zn interstitials also translated into dramatic increase in resistivities (Figure 5.c). This strong correlation suggests depending on the growth temperature zinc interstitials can be a contributor to n-type conductivity.

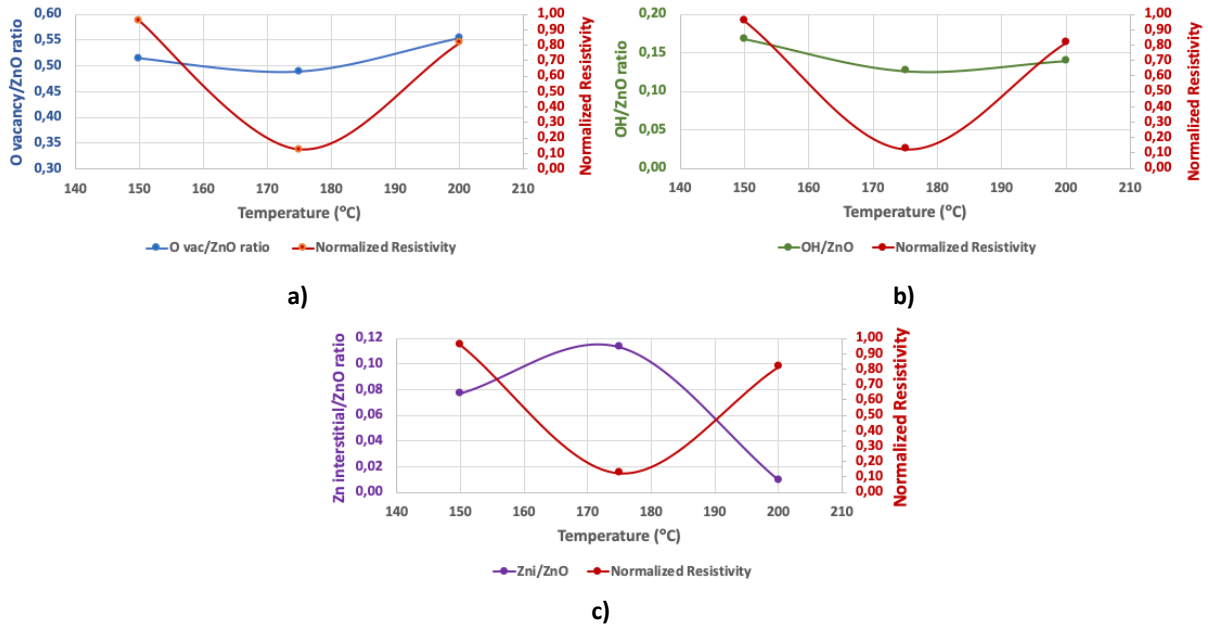


Figure 5. The effect of growth temperature on **a)** normalized concentration of V_O and its correlation with normalized resistivity, **b)** normalized concentration of OH and its correlation with normalized resistivity, **c)** normalized concentration of Zn_i and its correlation with normalized resistivity. (Büyüme sıcaklığının, a) normalize edilmiş oksijen boşlukları konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, b) normalize edilmiş OH konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, c) normalize edilmiş atomlar arası çinko konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine etkileri)

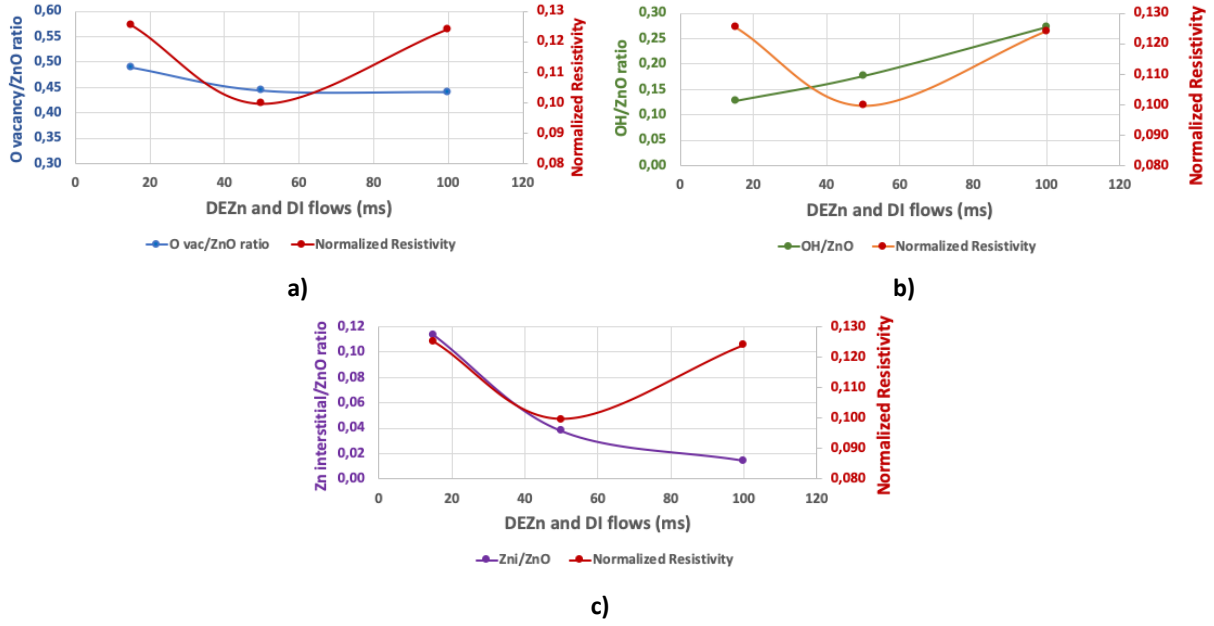


Figure 6. The effect of DEZ and DI water pulse times (at DEZ/DI ratio=1) on **a)** normalized concentration of V_O and its correlation with normalized resistivity, **b)** normalized concentration of OH and its correlation with normalized resistivity, **c)** normalized concentration of Zn_i and its correlation with normalized resistivity. (DEZ ve DI atış sürelerinin (DEZ/DI oranı sabit olarak 1 iken), a) normalize edilmiş oksijen boşlukları konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, b) normalize edilmiş OH konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, c) normalize edilmiş atomlar arası çinko konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine etkileri)

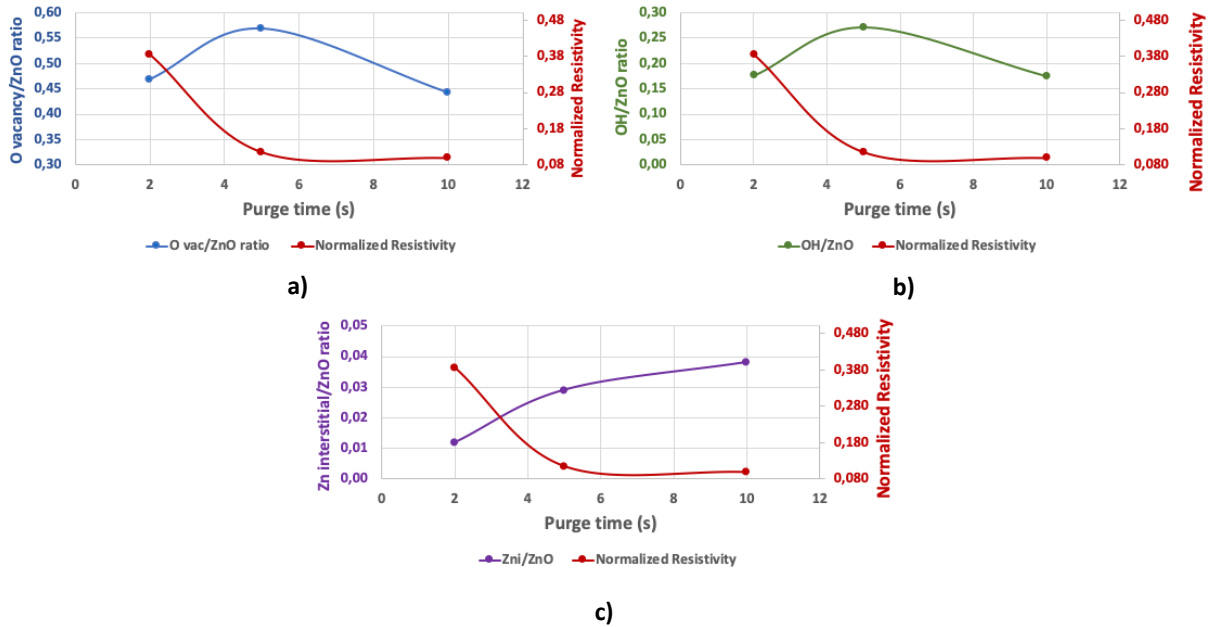


Figure 7. The effect of nitrogen purge time on **a)** normalized concentration of V_O and its correlation with normalized resistivity, **b)** normalized concentration of OH and its correlation with normalized resistivity, **c)** normalized concentration of Zn_i and its correlation with normalized resistivity. (Azot yıkama süresinin, a) normalize edilmiş oksijen boşlukları konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, b) normalize edilmiş OH konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, c) normalize edilmiş atomlar arası çinko konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine etkileri)

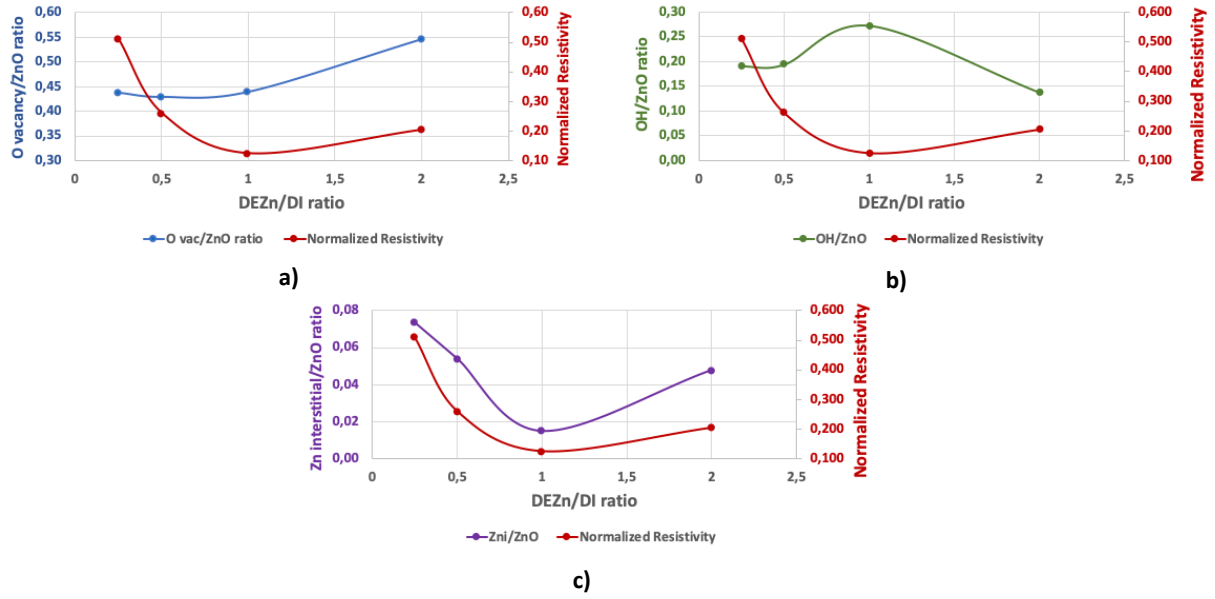


Figure 8. The effect of DEZ/DI ratio on a) normalized concentration of V_O and its correlation with normalized resistivity, b) normalized concentration of OH and its correlation with normalized resistivity, c) normalized concentration of Zn_i and its correlation with normalized resistivity. (DEZ/DI oranının, a) normalize edilmiş oksijen boşlukları konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, b) normalize edilmiş OH konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine, c) normalize edilmiş atomlar arası çinko konsantrasyonu ve normalize edilmiş özdirenç ilişkisine etkileri)

The strongest correlation was observed for hydrogen (as $Zn(OH)_2$) at varying DEZn/DI water ratios. After temperature, the most influential growth parameter on structural properties was DEZn/DI water pulse time ratio. At 175°C growth temperature and 10 second purge time, as DEZn/DI ratio was increased (50/200, 50/100, 100/100) from 0.25 to 1, ZnO films went from O-rich to Zn-rich. At the ratio of 1 the lowest resistivities were obtained along with highest hydrogen concentration as can be seen in Figure 8.b. The 100/100 ratio led to saturated Zn sites and stoichiometrically balanced ZnO films. XRD data also suggested a

balanced mix between (100) and (002) orientations. After DEZn/DI ratio of 2, XRD data and XPS data suggested that ZnO films are in Zn-rich/O-deficient with increased oxygen vacancies. Therefore, the number of hydrogens existed as attached to OH decreased and the resistivity values increased. This is a strong direct evidence that hydrogen impurities are the main contributors to n-type conductivity in ZnO. There was no correlation between the oxygen vacancy concentration nor zinc interstitials, and resistivities for change in DEZn/DI ratio.

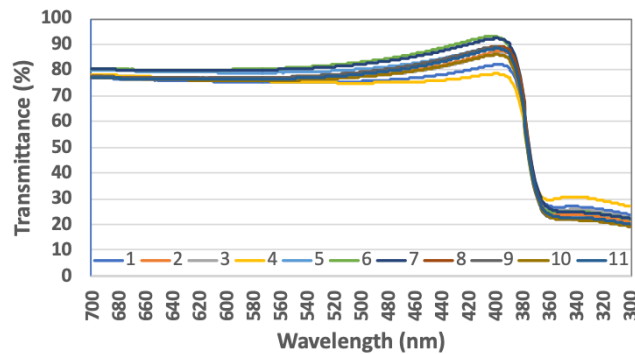


Figure 9. % Transmittance in visible spectrum of 11 samples with various ALD growth parameters (Farklı ALD büyütme parametreleri ile büyütülmüş 11 numunenin görünür bölgede % geçirgenliği)

3.3. Optical Property: %Transmittance (Optik özellikler: % Geçirgenlik)

In addition to electrical properties, average % transmittance values in visible wavelength range was taken as shown in Figure 9 and Table 6. Accordingly, these values ranged from 74.3% for 200°C grown sample to 92.3% for 5 second nitrogen purged sample. The same values ranged from 74% to 90% in literature [55]. Therefore the data obtained in this work is in agreement with literature data and can be used for TCO applications.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The influence of different type of defects and impurities on the electrical behaviour of ZnO has long been debated. DFT calculations theoretically suggested hydrogen is the main carrier for n-type conductivity in ZnO [7,25-26, 28-31]. While many experimental researchers suggested oxygen vacancies or the zinc interstitials as the source of n-type conductivity [32-35]. In this study, these defect/impurity formations based on growth conditions and their contribution to electrical conductivity was expermentally investigated.

According to structural studies, the most important growth parameter that controls the surface reaction dynamics was temperature. The second most important parameter was DEZ to DI ratio. Once the purge time was kept at sufficiently long times (5 sec and above) and the DEZ and DI water pulse times kept at sufficiently long times to saturate the surface (50 ms and above), playing with growth temperature and tuning in the DEZ/DI ratio would give the lowest resistivity values. There was a strong evidence that hydrogen impurities in the form of Zn(OH)₂ contributes to n-type conductivity. Another correlation suggested depending on the growth temperature zinc interstitials can be a contributor to n-type conductivity. This correlation should be investigated for longer (50 ms and longer) DEZ and DI water pulse times. There was a little evidence that oxygen vacancies can be a contributor to n-type conductivity in ZnO films.

The lowest resistivity value was obtained at 175°C as 0.0074 ohm.cm. The carrier densities ranged in between $1-8 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, and the mobility values were 3-24.5 cm²/Vs. The highest average % transmittance value obtained was 92.3%.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

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

Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Salami, H., Uy, A., Vadapalli, A., Grob, C., Dwivedi, V., & Adomaitis, R. A., Atomic layer deposition of ultrathin indium oxide and indium tin oxide films using a trimethylindium, tetrakis(dimethylamino)tin, and ozone precursor system, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 37(010905), (2019).
- [2] Frank, G., and Köstlin, H., Electrical properties and defect model of tin-doped indium oxide layers, *Applied Physics A Solids and Surfaces*, 27(4) (197–206), (1982).
- [3] Choi, Y. J., and Park, H. H., A simple approach to the fabrication of fluorine-doped zinc oxide thin films by atomic layer deposition at low temperatures and an investigation into the growth mode, *Journal of Materials Chemistry C*, 2(1) (98–108), (2014).
- [4] Khan, S., & Stamate, E., Comparative Study of Aluminum-Doped Zinc Oxide, Gallium-Doped Zinc Oxide and Indium-Doped Tin Oxide Thin Films Deposited by

- Radio Frequency Magnetron Sputtering, *Nanomaterials*, 12(9), (2022).
- [5] Polat Gonullu, M., and Ates, H., An Overview of Atomic Layer Deposition Technique: Synthesis of ZnO, TiO₂ and Al₂O₃ Films, *GU J Sci, Part C*, 7(3) (649-660), (2019).
- [6] Florescu, D.I., Mourokh, L.G., Pollak F.H., Look, D.C., Cantwell, G., and Li, X., High spatial resolution thermal conductivity of bulk ZnO (001), *Journal of Applied Physics*, 91 (890-892), (2002).
- [7] Ozgur, U., Alivov, I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Dogan, S., Avrutin, V., Cho, S.J., and Morkoc, H., A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal of Applied Physics*, 98 (041301), (2005).
- [8] Tuomisto, F., Saarinen, K., Look, D.C., and Farlow, G.C., *Physical Review B*, 72 (085206), (2005).
- [9] Mang, A., Reimann, K., and Rübenaacke, S., Bandgaps, crystal-field splitting, spin-orbit coupling, and exciton binding energies in ZnO under hydrostatic pressure, *Solid State Communications*, 94 (4) (251-254), (1995).
- [10] Reynolds, D.C., Look, D.C., and Jogai, B., Optically Pumped Ultraviolet Lasing From ZnO, *Solid State Communications*, 99 (12) (873-875), (1996).
- [11] Molarius, J., Kaitila, J., Pensala, T., Ylilampi, M., Piezoelectric ZnO films by r.f. sputtering, *J. Of Matr. SCI.: MATERIALS IN ELECTRONICS*, 14 (431-435), (2003).
- [12] Look, D.C., Recent advances in ZnO materials and devices. *Mater Sci Eng B.*, 80 (383-387), (2001).
- [13] Nause, J. and Nemeth, B., Pressurized melt growth of ZnO boules, *Semiconductor Science and TECHNOLOGY*, 20(4) (S45-S48), (2005).
- [14] Klingshirn, C., ZnO: From basics towards applications, *Physica Status Solidi (b)*, 244(9) (3019-3407), (2007).
- [15] Ellmer, K., Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes, *Nature Photonics*, 6 (809-817), (2012).
- [16] Pearton, S., and Ren, F., Advances in ZnO-based materials for light emitting diodes, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 3 (51-55), (2014).
- [17] Hultqvist, A., Aitola, K., Sveinbjörnsson, K., Saki, Z., Larsson, F., Törndahl, T., Johansson, E., Boschloo, G., Edoff, M., Atomic Layer Deposition of Electron Selective SnO_x and ZnO Films on Mixed Halide Perovskite: Compatibility and Performance. *ACS applied materials & interfaces*, 9 (29707-29716), (2017).
- [18] Carcia, P.F., McLean, R.S., and Reilly, M.H., High-performance ZnO thin-film transistors on gate dielectrics grown by atomic layer deposition, *Applied Physics Letters*, 88 (123509), (2006).
- [19] Ye, Z., Xu, H., Liu, T., Liu, N., Wang, Y., Zhang, N., and Liu, Y., Highly Stable Atomic Layer Deposited Zinc Oxide Thin-Film Transistors Incorporating Triple O₂ Annealing, *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 64-10 (4114-4122), (2017).
- [20] Karpina, V., Lazorenko, V., Lashkarev, C., Dobrowolski, V., Kopylova, L., Baturin, V., Pustovoytov, S., Karpenko, A. J., Eremin, S., and Lytvyn, P., Zinc oxide-analogue of GaN with new perspective possibilities, *Crystal Research and Technology*, 39 (980-992), (2004).
- [21] Gorla, C., Emanetoglu, N., Liang, S., Mayo, W., Lu, Y., Wraback, M., and Shen, H., Structural, optical, and surface acoustic wave properties of epitaxial ZnO films grown on (0112) sapphire by metalorganic chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, 85 (2595-2602), (1999).
- [22] Jung, S., Park, W., Cheong, H., Yi, G.C., Jang, H., Hong, S., and Joo, T., Time-resolved and time-integrated photoluminescence in ZnO epilayers grown on Al₂O₃ (0001) by metalorganic vapor phase epitaxy, *Applied Physics Letters*, 80 (1924), (2002).
- [23] Zu P., Tang, Z.K, Wang, G.K.L., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H.,

- and Segawa, Y., *Solid State Communications*, 103 (459-463), (1997).
- [24] Jin, B.J., Im, S., and Lee, S.Y., Violet and UV luminescence emitted from ZnO thin films grown on sapphire by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 366 (107-110), (2000).
- [25] Janotti, A., and Van De Walle, C.G., Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, *Reports on Progress in Physics*, 72 (126501), (2009).
- [26] Ayoub, I., Kumar, V., Abdolhassani, R., Sehgal, R., Sharma, V., Sehgal, R., Swart, H.C., and Mishra, Y.K., Advances in ZnO manipulation of defects for enhancing their technological potentials, *Nanotechnology Reviews*, 11 (575-619), (2022).
- [27] Dutta, S., Chattopadhyay, S., Sarkar, A., Chakrabarti, M., Sanyal, D., and Jana D., Role of defects in tailoring structural, electrical and optical properties of ZnO, *Progress in Materials Science*, 54 (89-136), (2009).
- [28] Janotti, A., and Van De Walle, C.G., Oxygen vacancies in ZnO, *Applied Physics Letters*, 87 (122102), (2005).
- [29] Janotti, A., and Van de Walle, C.G., New insights into the role of native point defects in ZnO, *Journal of Crystal Growth*, 287 (58–65), (2006).
- [30] Janotti, A., and Van de Walle, C.G., Native point defects in ZnO, *Phys Rev B*, 76 (165202), (2007).
- [31] Guziewicz, E., Godlewski, M., Krajewski, T.A., Wachnicki, L., Luka, G., Domagala, J.Z., Paszkowicz, W., Kowalski, B.J., Witkowski, B.S., Duzynska, A., and Suchocki, A., Zinc oxide grown by atomic layer deposition - a material for novel 3D electronics, *Physica Status Solidi (b)* 247 (1611-1615), (2010).
- [32] Liu, L., Mei, Z., Tang, A., Azarov, A., Kuznetsov, A., Xue, Q., and Du, X., Oxygen vacancies: The origin of n-type conductivity in ZnO, *Physical Review B*, 93 (235305), (2016).
- [33] Halliburton, L.E., Giles, N.C., Garces, N.Y., Luo, M., Xu, C., Bai, L. and Boatner, L.A., Production of native donors in ZnO by annealing at high temperature in Zn vapor, *Applied Physics Letters*, 87 (172108), (2005).
- [34] Hagemark, K.I., and Toren, P.E., Determination of Excess Zn in ZnO: The Phase Boundary. *Journal of Electrochemical Society*, 122 (992), (1975).
- [35] Tuomisto, F., Saarinen, K., Graszka, K., and Mycielski, A., Observation of Zn vacancies in ZnO grown by chemical vapor transport, *Physica Status Solidi (b)*, 243(4) (794-798), (2006).
- [36] Guziewicz, E., Krajewski, T.A., Przedziecka, E., Korona, K.P., Czechowski, N., Kłopotowski, L., and Terziyska, P., Zinc Oxide Grown by Atomic Layer Deposition: From Heavily n-Type to p-Type Material, *Phys. Status Solidi B*, 257 (1900472), (2020).
- [37] Guziewicz, E., Godlewski, M., Wachnicki, L., Krajewski, T.A., Luka, G., Gieraltowska, S., Jakiela, R., Stonert, A., Lisowski, W., Krawczyk, M., Sobczak, J.W., and Jablonski, A., *Semiconductor Science and Technology*, 27 (074011), (2012).
- [38] Guziewicz, E., Kowalik, I.A., Godlewski, M., Kopalko, K., Osinniy, V., Wojcik, A., Yatsunencko, S., Lusakowska, E., Paszkowicz, W., and Guziewicz, M., Extremely low temperature growth of ZnO by atomic layer deposition, *Journal of Applied Physics*, 103 (033515), (2008).
- [39] Pung, S., Choy, K., Hou, X., and Shan, C., Preferential growth of ZnO thin films by the atomic layer deposition technique, *Nanotechnology*, 19 (435609), (2008).
- [40] Weckman, T., and Laasonen, K., Atomic Layer Deposition of Zinc Oxide: Study on the Water Pulse Reactions from First-Principles, *The Journal of Physical Chemistry*, 122 (7685-7694), (2018).
- [41] Fujimura, N., Nishihara, T., Goto, S., Xu, J., and Ito, T., Control of preferred orientation for ZnO_x films: control of self-

- texture, *Journal of Crystal Growth*, 130 (269-279), (1993).
- [42] Nguyen, T., Valle, N., Guillot, J., Bour, J., Adjeroud, N., Fleming, Y., Guennou, M., Audinot, J.N., El Adib, B., Joly, R., Arl, D., Frache, G., and Polesel-Maris, J., Elucidating the growth mechanism of ZnO films by atomic layer deposition with oxygen gas via isotopic tracking, *Journal of Materials Chemistry C*, 9 (4307-4315), (2021).
- [43] Lim, J., and Lee, C., Effect of substrate temperature on the microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films prepared by atomic layer deposition, *Thin Solid Films*, 515 (3335-3338), (2007).
- [44] Cabral, L., Lopez-Richard, V., Da Silva, J.L.F., Marques, G.E., Lima, M.P., Onofre, Y.J., Teodoro, M.D., and Godoy, M.P.F., Insights into the nature of optically active defects of ZnO, *Journal of Luminescence*, 227 (117536), (2020).
- [45] Iqbal, J., Jilani, A., Hassan, P.M.Z., Rafique, S., Jafer, R., and Alghamdi, A.A., ALD grown nanostructured ZnO thin films: Effect of substrate temperature on thickness and energy band gap, *Journal of King Saud University-Science*, 28 (347-354), (2016).
- [46] Gordillo, G., Florez, J.M., and Hernandez, L.C., Preparation and characterization of CdTe thin films deposited by CSS, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (273-281), (1995).
- [47] Ameer, S.B., Bel hadjtaief, H., Barhoumi, A., Duponchel, B., Leroy, G., Amlouk, M., and Guermazi, H., Physical investigations and photocatalytic activities on ZnO and SnO₂ thin films deposited on flexible polymer substrate, *Vacuum*, 155 (546-552), (2018).
- [48] Mishra, S., Przewdziecka, E., Wozniak, W., Adhikari, A., Jakiel, R., Paszkowicz, W., Sulich, A., Ozga, M., Kopalko, K., and Guzewicz, E., Structural Properties of Thin ZnO Films Deposited by ALD under O-Rich and Zn-Rich Growth Conditions and Their Relationship with Electrical Parameters, *Materials*, 14 (4048), (2021).
- [49] Jain, S., Shah, J., Negi, N.S., Sharma, C., and Kotnala, R.K., Significance of interface barrier at electrode of hematite hydroelectric cell for generating ecpower by water splitting, *International Journal of Energy Research*, 44, 14 (11111-11134), (2019).
- [50] Cho, Y., and Kang, K., and Park, H., Anion-controlled passivation effect of the atomic layer deposited ZnO films by F substitution to O-related defects on the electronic band structure for transparent contact layer of solar cell applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 132 (403-409), (2015).
- [51] Crist B.V., (1999) *Handbook of Monochromatic Xps Spectra*, vol. 2, Commercially Pure Binary Oxides, XPS International Inc., Mountain View, California, 94040, USA, (818-827).
- [52] Galmiz, O., Stupavska, M., Wulff, H., Kersten, H., Brablec, A., Cernak, M., Deposition of Zn-containing films using atmospheric pressure plasma jet, *Open Chem.*, 13 (198-203), (2015).
- [53] Godlewski, M., Guzewicz, E., Luka, G., Krajewski, T., Lukaszewicz, M., Wachnicki, L., Wachnicka, A., Kopalko, K., and Dalati, A.S., ZnO layers grown by Atomic Layer Deposition: A new material for transparent conductive oxide, *Thin Solid Films*, 518 (1145-1148), (2009).
- [54] Chandrasekar, L.B., Nagarajan, S., Karunakaran, M., and Thangadurai, T.D., (2019) Structural, optical and electrical properties of undoped and doped ZnO thin films, *2D Materials*, eBook.
- [55] Laube, J., Nübling, D., Ben, H., Gutsch, S., Hiller, D., and Zacharias, M., Resistivity of atomic layer deposition grown ZnO: The influence of deposition temperature and post-annealing, *Thin Solid Films*, 603 (377-381), (2016).