



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 36

Sayı/Issue: 3

Eylül/September 2021

ISSN 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University, Journal of the Faculty of
Engineering



Sahibi (Owner)

Ulus ÇEVİK
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ramazan ÇOBAN (ÇÜ)	Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (ÇÜ)
Mutlu AVCI (ÇÜ)	Özen KILIÇ (ÇÜ)
Mustafa GÖK (ÇÜ)	Serin MEZARCIÖZ (ÇÜ)
Ahmet DAĞ (ÇÜ)	Zeynep ZAIMOĞLU (ÇÜ)
Hüseyin AKILLI (ÇÜ)	Ali KESKİN (ÇÜ)
Ulus ÇEVİK (ÇÜ)	R. Tuğrul OĞULATA (ÇÜ)
Ali KOKANGÜL (ÇÜ)	F. Duygu SABAN (ÇÜ)
Mesut BAŞIBÜYÜK (ÇÜ)	Hüseyin VAPUR (ÇÜ)
Mevlüt Sami AKÖZ (ÇÜ)	Hüseyin R. YERLİ (ÇÜ)
Metin GÜRÜ (GÜ)	Serter ATABAY (AUS-BAE)
Mehmet Emin AYDIN (UWE-İngiltere)	Muammer KOÇ (HBKU-BAE)
Azra BİLGİN (UCB-ABD)	Tamio ENDO (MU-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted.

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Biyogaz Üretiminde Atıkların Verim Üzerine Etkilerinin Araştırılması.....	581
<i>The Investigation of the Waste Effect on Biogas Production</i>	
İrfan Ruhi UÇAR, Zekeriya ÖZER ve Oğuz Yunus SARIBIYIK	
Bir Denim Konfeksiyon İşletmesinde Otomasyon Sistemlerinin, İş Sürelerindeki İyileşmeye Olan Etkisinin Değerlendirilmesi.....	591
<i>Evaluation of the Effect of Automation Systems on Improvement in Work Period in a Denim Apparel Plant</i>	
Hilal BİLGİÇ	
Ce-Mn-TiO₂/Kordiyerit Katalizörünün SCR Aktivitesine Ca İçerikli Küllerin Etkisi.....	601
<i>Effect of Ca Containing Ashes on SCR Activity of Ce-Mn-TiO₂/Cordierite Catalyst</i>	
Ali KESKİN	
Flow Structures Downstream of Square-shaped Cylinder in Channel.....	607
<i>Düz Kanal İçerisine Yerleştirilmiş Kare Şekilli Silindir Ardındaki Akış Yapısı</i>	
Nazım KURTULMUŞ	
Energy-Exergy and Cost Analyses of Solar Tower Systems with Various Capacities for Mersin Province	615
<i>Mersin Mut İlçesi için Farklı Kapasiteli Güneş Kuleleri Enerji Ekserji Analizi ve Maliyet Analizi</i>	
Elif TURNA DİLSEL ve Bengi GÖZMEN ŞANLI	
Lift Coefficient Estimation of a Delta Wing Under the Ground Effect Using Artificial Neural Network.....	625
<i>Yer Etkisi Altındaki Delta Kanat Üzerinde Oluşan Taşıma Katsayısının Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Tahmin Edilmesi</i>	
Sergen TÜRME, Mehmet BİLGİLİ ve Beşir ŞAHİN	
Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi	637
<i>Evaluation of Industry 4.0 Integration of Manufacturing Enterprises with Data Envelopment Analysis</i>	
Adem ERİK ve Yusuf KUVVETLİ	

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Dört Noktalı Eğme Testi Altında Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bindirme Bağlantısının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi 649**
Experimental and Finite Element Analysis of Adhesive Bonded Lap Joint Subjected to Four-Point Bending Test
Salih AKPINAR ve Ahmet ÇALIK
- Dikkat Modülleri ile Oluşturulmuş Derin Öğrenme Modelini Kullanarak Pamuk Hastalığının Tespiti 659**
Detection of Cotton Disease Using Deep Learning Model Created with Attention Modules
Mesut TOĞAÇAR
- The Effect of Using Different Refrigerants on System Performance in Two-Stage Organic Rankine Cycle..... 669**
İki Aşamalı Organik Rankine Çevriminde Farklı Soğutucu Akışkan Kullanımının Sistem Performansına Etkisi
Ahmet KAPLAN ve Arif ÖZBEK
- Harflerden Oluşan Genişletilmiş MNİST Veri Kümesinin Derin Öğrenme Tabanlı Tasarlanmış Sinir Ağı Modeli ile Sınıflandırılması..... 681**
Classification of Extended MNIST Dataset Consisting of Letters with Deep Learning-Based Designed Neural Network Model
Mesut TOĞAÇAR
- Molibden ve Vanadyum İlavesinin Fe-Cr-C Sert Dolgu Alaşımlarının Aşınma Direncine Etkisi 691**
The Effect of Molybdenum and Vanadium on Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys
Nilay ÇÖMEZ, Canser GÜL ve Hülya DURMUŞ
- Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Adıyaman Gölbaşı-Adıyaman Merkez Arasının Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi 701**
Landslide Susceptibility Assessment Between Adıyaman Gölbaşı-Adıyaman Center with Artificial Neural Network Methods
Berna TANRIVERDİ, Osman ORHAN ve Senem TEKİN

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Ni-B/TiB₂ Elektrodepolanmış Kompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Belirlenmesi 709**
Determination of Corrosion Resistance of Ni-B/TiB₂ Electrodeposited Composite Coatings
Ersin ÜNAL, Abdulkadir YAŞAR ve İsmail Hakkı KARAHAN
- Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316 Paslanmaz Çelik ve Karbonlu Çelik Çiftlerinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi..... 719**
Investigation of Mechanical Properties and Microstructures of AISI 316 Stainless Steel and Carbon Steel Pairs Combined by Friction Stir Welding
Yeliz ALNAK, Ali ÖZER ve Vedat SAVAŞ
- The Investigation of Corrosion Performance and Durability of Hydroxyapatite-Coated Titanium Implants and the Effect of Antibiotic Additives..... 735**
Hidroksiapatit Kaplı Titanyum İmplantların Korozyon Performansı ve Dayanıklılığının ve Antibiyotik Katkı Maddelerinin Etkisinin Araştırılması
Demet YAZICI, Nilgün ALPAY ve Başak DOĞRU MERT
- Fotovoltaik Panel ve Batarya Entegre Sistemler için Yeni Bir Interleaved Tabanlı Çok Portlu İzole DA-DA Dönüştürücü Analizi 743**
Analysis of a New Interleaved-Based Multi-Port Isolated DC-DC Converter for Photovoltaic Panel and Battery Integrated Systems
Murat Mustafa SAVRUN ve Alihan ATAY
- Yapısal Olarak Değiştirilmiş HMX-DFT Çalışması 755**
Structurally Modified HMX-A DFT Study
Mehmet Erman MERT
- Agro-Endüstriyel Atık Olan Elma Posalarının Box-Behnken Yanıt Yüzey Metodolojisi ile Alkali Ön İşlem Optimizasyonu..... 769**
Alkaline Pre-Treatment Optimization of Agro-Industrial Waste Apple Pulp with Box-Behnken Response Surface Methodology
Özgecan MADENLİ ve Ece Ümmü DEVECİ
- Kütle Spektrometresi Verileri Kullanılarak Yumurtalık Kanserinin Yapay Sinir Ağlarıyla Sınıflandırılması 781**
Classification of Ovarian Cancer with Neural Networks Using Mass Spectrometry Data
Demet YEŞİLBAŞ ve Ayşegül GÜVEN

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Generation of Alternating Droplets with Different Viscosities in a Microfluidic Channel 791**
Mikroakışkan Kanalda Farklı Vizkozitelerde Sıralı Damlacık Oluşturulması
Muhammad SAQIB ve E. Yegan ERDEM
- Afşin-Elbistan Termik Santral Külünün Standarda Uygun Hale Getirilmesi ve Beton Katkısı Olarak Değerlendirilmesi..... 799**
Investigation of the Effects of Afşin-Elbistan Thermal Power Plant Ash on Concrete
Hüseyin TEMİZ, Kadir ELBİSTAN ve Betül PAKÖZ
- Flow and Mechanical Characteristics of a Modified Naca Wing Geometry..... 815**
Değiştirilmiş Bir Naca Kanat Geometrisinin Akış ve Mekanik Özellikleri
Mustafa Murat YAVUZ
- Estimation of the Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Sorptivity of Terraced Soil Using Four-Term Expansions of the Haverkamp Model 827**
Haverkamp Modelin 4 Terimli Uzantısını Kullanılarak Teras Zeminin Doygun Hidrolik İletkenlik ve Sorptivite Tayini
Deniz YILMAZ
- 3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi..... 835**
Investigation of the Mechanical Properties of Flexural Test Samples Produced Using Different Printing Parameters with a 3D Printer
Muhammed Safa KAMER, Oğuz DOĞAN, Şemsettin TEMİZ ve Hakan YAYKAŞLI

Biyogaz Üretiminde Atıkların Verim Üzerine Etkilerinin Araştırılması

İrfan Ruhi UÇAR¹, Zekeriya ÖZER¹, Oğuz Yunus SARIBIYIK^{*1}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Genetik ve
Biyomühendislik Bölümü, Gümüşhane

Geliş tarihi: 20.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Ülkelerin refah seviyesi kişi başı enerji tüketim miktarları ve sanayii gelişimleri gibi parametreler birbiriyle doğrudan alakalıdır. Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artması ve yaşam standartların yükselmesi gibi nedenler fosil kökenli yakıtların tüketim hızının sürekli artmasına sebep olmaktadır. Fosil kaynaklar yenilenebilir olmadığından dolayı biyodizel, biyogaz, rüzgâr, hidroelektrik, güneş enerjisi, yeni temiz alternatif sürdürülebilir, gibi enerji kaynaklarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu alternatif enerjiler içerisinde biyogaz üretimi, kurulum kolaylığı, bol hammadde miktarı ve kolay ulaşılabilirlik, düşük maliyet, işlenmiş biyokütle kaynağının gübre verimini artırması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Biyogaz üretiminde, reaktör tasarımı, reaksiyon şartlarının değiştirilmesi, bakterilerin beslenme türleri biyogaz üretimini artırmaktadır. Yapılan bu çalışmada, 50 L (Litre)'lik laboratuvar tipi pilot reaktör kullanılarak uygun fermantasyon şartları sağlanmış ve çeşitli endüstriyel- evsel atıklar gibi farklı atık türlerinin biyogaz üretimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre, biyogaz üretimi farklı atık türlerine göre değişiklik göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyoyakıt, Biyogaz, Atık bertarafı, Beslemenin etkisi

The Investigation of the Waste Effect on Biogas Production

Abstract

The amount of the energy consumption rate are directly related to the such a parameters the welfare level and industrial revolution. Additionally to those reason, the energy utilization intensively rises depending on the increasing world population and higher welfare level standarts. Carbon based fuels are not renewable and environmentally unfriendly therefore many of the research group and university have been working on renewable and sustainable energy sources such as hydrogen, solar, wind, geothermal, wave, biodiesel and biogas. Biogas production has been preferred beacuse of those reasons, easy construction and transportation, sustainability and also fermantated biomass is very effective fertiliser for agriculture in farms. The type of the reactor, the fermantation conditions, the feeding of the bacteria has increased the biogas production from different waste sources. In this study, 50 liter lab scale pilot reactor was designed and the fermantation conditions, and the effect of the different wastes such as vegetable waste, organic industrial waste and etc. were investigated on the biogas production yield. The results showed that fermentation condition and feeding play an important role for biogas production that tea dreg decrease the biogas while mulberry dreg and other vegetable sources increase the biogas production.

Keywords: Biofuel, Biogas, Waste treatment, Feeding effect

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Oğuz Yunus SARIBIYIK, oyzaribiyik@gumushane.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak ortaya çıkan enerji ihtiyacı fosil kaynaklı yakıtlardan sağlandığı için atmosferdeki karbondioksit (CO₂) miktarı 1970 yılında 325 ppm iken son yapılan analizlere göre 2020 yılında 409 ppm olarak ölçülmüştür [1]. Karbondioksitin atmosferdeki miktarının artmasına bağlı olarak yerküreden uzaya yayılması gereken ışınlar atmosferdeki karbondioksit tarafından tutulduğu için atmosfer altı sıcaklığın yükselmesine sebep olmaktadır ve bu olay genel olarak küresel ısınma olarak adlandırılmaktadır [1]. Küresel ısınmaya sebep olan bir diğer gaz ise metan (CH₄) gazıdır ve yenilenemediği için atmosferde sürekli birikmeye devam ederken ayrıca hava kirliliğine de sebep olmaktadır [2,3]. Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği ile mücadele etmek için fosil kaynaklı yakıtların yerine alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Özellikle Avrupa başta olmak üzere birçok devlet alternatif enerji üretimini teşvik etmektedir [5-13]. Bu sebeple biyodizel, güneş enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi ve biyogaz yoğun şekilde araştırılmaktadır [4,14-19]. Bu alternatif enerji kaynaklarının içerisinde ucuz ve bol hammadde kaynağı, uygulanabilir olması, doğaya salınan metan gazından dolayı küresel ısınmayı ve hava kirliliğini azaltmaktadır. Bunların yanı sıra, birim mol başına daha az karbondioksit üretiminden dolayı metanın diğer yakıtlara oranla daha çevreci olması gibi sebepler ve fermantasyon sonrası oluşan ürünün doğal gübre olarak kullanılabilirliği biyogazın biraz daha ön plana çıkmasını sağlamaktadır [20,21]. Ayrıca, biyogaz üretimi sonucu elde edilen organik gübre kullanımı sentetik gübreyle bağlı olarak artan tuzluluğu ve ağır metal birikimini azaltarak toprakların temiz ve verimli kalmasını sağlamaktadır [20-24].

Biyogaz üretimi büyükbaş, küçükbaş, kanatlı hayvan grubundan elde edilen biyo kütlelerden, tarımsal ve şehirsal organik atıklardan üretilebilmektedir [25,26]. Özellikle şehirler, tarımsal ve evsel organik atıkların bu şekilde düşük maliyetli ve faydalı bertarafı hem kötü koku, görünüm ve bulaş riskini azaltır hem de atıklardan yüksek kalorili 5200 kcal/Nm³ enerji üretimini

sağlamaktadır [24]. Dünyadaki organik atıkların 2,2 milyar ton/yıl, organik tarım atıklarının 6 milyar ton/yıl, kişi başı olarak atık ise 165-225 kg/yıl hesaplanmaktadır [22,24,27]. Bu kadar büyük miktardaki atıktan oluşan metanın atmosfere yayılımının devam etmesi halinde, karbondioksitle birlikte metanın küresel ısınmaya etkisinin %84 oranında artacağı belirtilmektedir [28]. Bu sebeple, atıklardan oluşan bu gazların uygun reaktörlerde biyogaza dönüştürülmesi ve faydalı amaçlara yönelik kullanılması gerekmektedir. Biyogaz üretiminde farklı reaktör tipleri, fermantasyon sıcaklığı ve farklı biyokütle kaynakları kullanımı biyogaz verimini değiştirmektedir [13,25,29]. Özellikle farklı biyokütle kaynaklarının kullanımı biyogaz üretiminde oluşan gaz miktarının büyük oranda değişmesine sebep olmaktadır [13,29]. Bunların yanı sıra, gıda amaçlı tüketilen biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde kullanılması gıda fiyatlarının yükselmesine neden olmaktadır [4]. Bu sebeple, özellikle algler, organik atıklar gibi yenilmeyen biyokütle kaynaklarının biyogaz verimi üzerine etkileri yoğun şekilde araştırılmaktadır [30]. Bu amaç için, evsel atık, domates, mango, portakal, ananas ve muz atığı gibi atıkların yanında balık işletmelerinin atıkları, peynir alt suyunun etkileri, protein içeriği yüksek olan kan, tavuk işletmelerinin protein içeriği yüksek atıklarının biyogaz verimi üzerine etkileri araştırılmaktadır [13,27].

Yapılan araştırmalar neticesinde, özellikle küçük ölçekli ve ev tipi biyogaz üretiminde bölgesel olarak ortaya çıkan biyokütle kaynaklarının herhangi ön işleme tabi tutulmadan biyogaz üretiminde etkilerinin araştırılması ile üretilen biyogaz miktarının artırılacağı görülmüştür [26]. Ön işlem yapılması her ne kadar biyogaz oluşumunu artırsa da üretim maliyetini artırmakta ve ön işlem sonrası oluşabilecek furfural ve benzerleri kimyasallar biyogaz oluşumuna negatif etki etmektedir [31-33].

Yapılan bu çalışmada, özellikle küçük işletmeler ve ev tipi biyogaz üretimi yapılan reaktörlerde organik kökenli bölgesel atıklar değerlendirilerek herhangi bir ön işlem yapmadan biyogaz üretimi yapıldığında atıkların biyogaz üretim verimini

nasil etkilediğine yönelik araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, bölgesel olarak birçok işletmede atık olarak ortaya çıkan dut pekmezi üretiminden sonra oluşan dut atığı gibi işletme atıkları kullanılmıştır. Bunlara ek olarak, organik evsel atıklar, bayat ekmeğin gibi tüm dünyada ortaya çıkan atıkların biyogaz üretimi üzerine etkileri de incelenmiştir. Ayrıca, protein içeriği yüksek yenilmeyen sakatat parçaları, tavuk derisi ve çay posası gibi atıkların biyogaz verimi üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Biyogaz üretimi gerçekleştirilirken hayvansal, evsel ve tarımsal biyokütle kaynakları kullanılabilir. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda biyogaz üretimi için 50 litrelik laboratuvar tipi 316 paslanmaz çelik metalden üretilmiş, gaz sızdırmaz, elektrik ısıtıcılı ve mekanik karıştırıcılı (dip süpürmeli) pilot biyoreaktörden elde edilen sonuçlar ve önceki çalışma sonuçları temel alınarak biyogaz üretim miktarı hesaplanmıştır.

Reaktör fermente süresinde 50 devir/dk ile ön karıştırma işlemi için 5 dk 275 devir/dk olarak (biyokütle: su oranları 1:1 olacak şekilde) uygulanmıştır. Fermentasyon işlemi sırasında reaktör sıcaklığı 37°C'de 5 devir/dk karıştırma hızıyla 30 gün sürede gerçekleştirilmiştir. Araştırılan malzemelerin boyut küçültme işlemi için 22 no'lu et kıyma makinası kullanılmıştır.

Reaktörde oluşan gaz miktarı Mastech MS6310 Gaz Dedektörü ile gazın tür analizleri ise portatif G5000 gaz analizörü kullanılarak yapılmıştır. Biyogaz üretiminde elde edilen gazların belirlenmesi için numune alma işlemlerinde Flexfoilplus numune çantası kullanılıp gazlar Agilent (6820) gaz kromatografisi kolon (molesieve 5A 30m x 0,53 mm x 50 µm) kullanılarak belirlenmiştir.

Biyogaz üretiminde %60 kaba ve %40 yoğunlaştırılmış yemle (selüloz içeriği %18'den küçük) beslenen 5 yaşında dişi (Simental) büyükbaş hayvanlardan temin edilen biyokütle günlük olarak kullanılmıştır. Deneylerde

hammadde olarak kullanılan biyokütlenin ağırlık ölçümleri (ıslak ağırlık biyokütle oluşumundan itibaren 12 saat içerisinde) alınarak yapılmıştır. Fermantasyonda 13 kg biyokütle, 13 kg saf su, 4 kg araştırması yapılan madde ilave edilmiştir.

Reaktörde oluşan mayaların araştırılmasında Nikon E200 marka mikroskoba bağlı Nikon fotoğraf makinasının 1-J1 modeli kullanılmıştır.

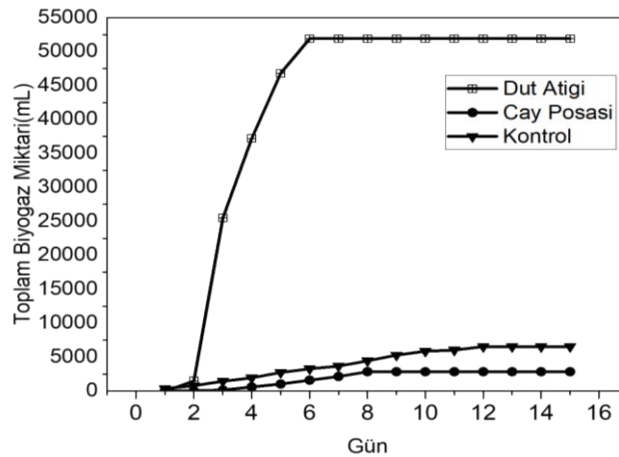
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Fosil yakıt kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan iklim değişikliği son yıllarda giderek artmaktadır. İklim değişikliğine bağlı olarak seller, kuraklık vb. doğal afetler gıda ve sağlık problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu sebeplerden dolayı fosil yakıt kullanımına bağlı oluşan karbondioksit miktarının sürdürülebilir şekilde azaltılmasına yönelik çözümlerin bulunması gerekmektedir. Alternatif yakıtların uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği göz önünde bulundurulduğunda, ucuz hammadde kaynağının bol ve bulunabilir olması biyogaz üretiminin daha avantajlı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, biyoproses sonrası oluşan organik gübrenin sentetik gübre yerine ikame edilebilecek olması, doğaya salınan metan gazından enerji elde edilerek küresel ısınmanın, toprak kirliliğinin ve ağır metal birikiminin azaltılması gibi faktörlerden dolayı biyogaz üretimi biraz daha ön plana çıkmaktadır [34,35]. Bunların dışında evsel ve sanayii organik atıklardan da biyogaz üretilebilir olması ve oluşan biyogazın sadece ısınma ve elektrik üretimi açısından değil aynı zamanda ulaşım amacı için kullanılabilir olması özellikle atıklardan biyogaz elde edilmesini daha anlamlı kılmaktadır [36,37]. Dünyada ortalama oluşan 2,2 milyar ton/yıl atıkların içeriği ülkelere ve coğrafyalara göre değişebilmektedir [27,38,39]. Örneğin Avrupa ülkelerinde 88 milyon ton yemek atığından 143 milyarlık ekstra maliyet oluşmaktadır [31]. Balık üretimi ve yağı üretilen yerlerde balık artıkları ve balık yağına bağlı atıklar oluşurken, tavuk çiftliklerinde de benzer durumlar oluşmaktadır [40-43]. Düşük yağış alan bölgelerde rahatlıkla büyüeyebilen dikenli incire bağlı ürünlerin değerlendirilmesi, peynir üretiminde alt suyu, kan gibi atıkların biyogaz üretiminde kullanıldığı

bilinmektedir. Bunlara ilave olarak, yeşil mısır gövdesi ve çimenden, sebze meyve atığı, selüloz içerikli atıklar, kahve atığı, algler vb. birçok atık malzemenin değerlendirilerek biyogaz elde edilmesi ve oluşan ürünün doğal gübre olarak kullanıldığı görülmektedir [16,30,32,33,43-52]. Biyogaz verimini artırmaya yönelik çalışmalarda C/N oranına bağlı olarak %20-30 aralığının uygun değer olduğu gösterilmektedir ancak moleküler bazda yapılan araştırmalarda metanojen bakterilerinin saflaştırılarak bakteriye özel incelemelere rastlanmamıştır [53,54]. Özellikle farklı coğrafyalarda ve besi ortamlarındaki canlıların biyokütlelerinde bulunan metanojen bakteri grupları değişiklik gösterdiği için yapılan çalışmaların sonuçlarında ciddi farklılıklar bulunmaktadır [54]. Protein içeriği zengin sakatat

atıkları ve uzun zincirli yağ asidi içeriği yüksek tavuk derisi ile yapılan çalışmalarda, önceki yayınlarda olduğu gibi yağların bakterileri kapsüle etmesinden dolayı biyogaz üretimi gerçekleşmemiştir [33,55-58]. Bu sebeple, bu tür atıklardan biyogaz üretimi prosesinden önce ön işleme tabi tutulması gerekmektedir [57].

Ülkemizde neredeyse üretilen ekmeğin yaklaşık %50'si çöpe atılmaktadır. Buna ilaveten, pekmez üretimi sonrası dut atığı oluşmakta ve bütün bölgelerde çay posası atığı oluşmaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmada ilk grup olarak dut atığı ve çay posası atığının biyogaz oluşumu üzerine etkileri incelenmiştir. Kontrol grubunda ayrıca herhangi bir atık ilavesi yapılmamıştır (Şekil 1).



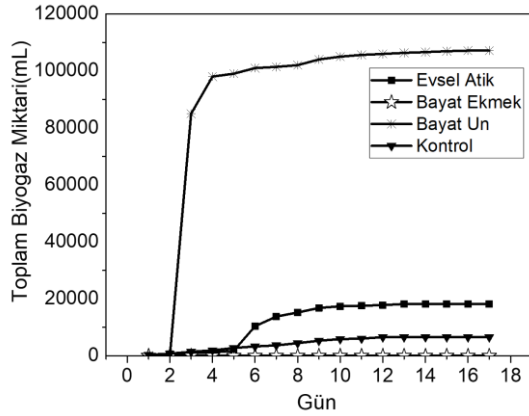
Şekil 1. Dut atığı, çay posası ve kontrol grubu biyogaz üretim grafiği

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek biyogaz üretimi Dut atığından, daha sonra kontrol grubu ve en düşük biyogaz üretimi ise çay posası ilaveli çalışmada gözlemlenmiştir (Şekil 1). Yapılan çalışmalarda karşılaşılan diğer durum ise atıkların biyogaz üretim miktarına etkileri oldukça farklılık göstermektedir. Kontrol grubunda 0,5 m³/ton biyogaz miktarı diğerlerine göre en az iken Dut atığı an fazla 2,9 m³/ton biyogaz üretimini gerçekleştirmiştir. Ayrıca kontrol grubu biyogaz oluşumunun 1. günden itibaren gerçekleşmeye başladığı görülmüştür. Dut atığı ilaveli çalışmada biyogaz üretiminin 2. günden itibaren arttığı Çay posası ilaveli biyogaz üretiminin ise 5. günden

itibaren artış gösterdiği görülmektedir. Çay atığı içeren reaktörden elde edilen biyogaz üretiminin düşük olmasının nedeninin, çay içerisinde bulunan yüksek miktardaki antimikrobiyal etkiye sahip polifenolik bileşiklerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir [47,59]. Ayrıca ligninin metanojen bakterileri tarafından bozundurulmadığı belirtilmektedir [60]. Bu sebeple, hem %25 lignin içeriğinin varlığı hem de polifenolik antibakteriyel bileşiklerin varlığı biyogaz üretiminde düşüşe sebep olabilmektedir [61].

Bir diğer araştırma grubunda ise Bayat ekme, evsel organik atıklar ve kontrol grubunun biyogaz

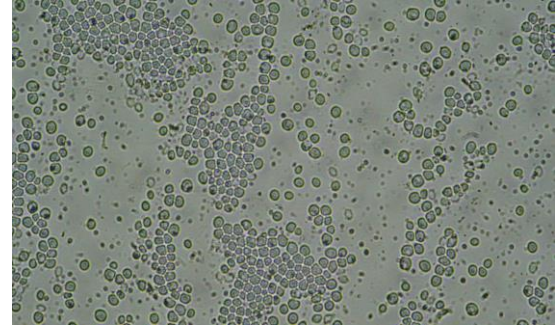
üretimi üzerine etkileri araştırılmıştır (Şekil 2). Özellikle Bayat ekmek ile yapılan çalışmada biyogaz üretimi gözlemlenmemiştir. Normal olarak hidrokarbon içeriği yüksek olan besi ortamında biyogaz üretiminin artması beklenmektedir [44]. Bu sebeple aynı şartlarda tekrar çalışmaları yapılmış ve yine biyogaz üretiminin gerçekleşmediği gözlemlenmiştir [31]. Aynı deney, son kullanım tarihi geçmiş bayat un ile yapıldığında biyogaz üretiminin hayli arttığı gözlemlenmiştir. Mikroskop ile yapılan incelemelerde ise ortamda maya kültürünün olduğu (Şekil 3) bu sebepten dolayı biyogaz üretiminin olmadığı gözlemlenmiştir [31].



Şekil 2. Evsel atık, bayat ekmek, bayat un, kontrol grubu biyogaz üretim grafiği

Yapılan ikinci grup çalışmasında ise bayat ekmek, evsel atık ve kontrol grubu incelenmiştir (Şekil 2). Sonuçlara göre hidrokarbon içeriği yüksek olan bayat un ilaveli reaktör 2. günden itibaren biyogaz üretimini artırırken evsel atık ilaveli çalışmada biyogaz oluşumu 5. günden itibaren artmaktadır. Bir önceki yapılan çalışmaya benzer olarak biyogaz oluşum süresinde dut atığı ve hidrokarbon benzer süreçlerde biyogaz oluşumu gerçekleşmiştir. Ancak lignin içeriği yüksek çay posası ve evsel atık gibi atıklarda biyogaz üretimi ancak 5. Günün sonucunda gözlemlenmiştir (Şekil 2) [61]. Çalışma sırasında, Evsel atıklardan toplamda 1,4 m³/ton biyogaz üretimi yapılmıştır fakat Bayat ekmek ilaveli çalışmada ise biyogaz üretimi gerçekleşmemiştir. Normal şartlarda hidrokarbonca zengin atıklarla beslenen metanojen

bakterilerinin biyogaz üretimlerinin yüksek olması beklenmektedir [22]. Bu sebeple, farklı bir atık kaynağı olarak kullanım süresi dolmuş un kullanılarak biyogaz üretimi üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada üretilen biyogaz miktarının 8,1 m³/ton olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2). Bu sonuçlardan sonra Bayat ekmek ile yapılan tekrar denemelerinde reaktör içerisinden alınan numune mikroskop ile incelenmiş ve reaktör içerisinde maya üretiminin gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 3). Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen görüntülerin önceki çalışmalarla uyumlu olduğu reaktör içerisinde maya üretiminin yoğun şekilde gerçekleştiği görülmektedir [31,62].



Şekil 3. Bayat ekmek ile beslenen reaktörden alınan örneğin mikroskop görüntüsü

4. SONUÇ

Dünyadaki toplam atık miktarının teknolojik gelişimlere ve nüfus artışına bağlı olarak artması atmosfere salınan karbondioksit ve metan miktarının yükselmesine sebep olarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Bu sebeple, özellikle atıkların geri dönüşüme kazandırılarak çevre temizliği sağlanmalı ve atmosfere salınan metan gazı miktarı azaltılmalıdır çünkü küresel ısınma sonucu meydana gelen iklim değişiklikleri gözle görülür şekilde ortaya çıkmaya başlamıştır. İçinden geçtiğimiz bu günlerde Marmara denizinde meydana gelen müsülaj problemi atık arıtımı ve yönetiminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, özellikle ev tipi ve küçük ölçekli işletmelerde kullanılabilecek farklı atıkların ön işleme tabi tutulmadan biyogaz üretimine etkileri daha da önemli hale gelmektedir.

Çünkü küçük ölçekli tesislerin sayısının ve veriminin artması alternatif enerji kullanımını artırarak küresel ısınmanın etkilerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu sebeple biyogaz üretiminde kullanılacak atıkların ve buna uygun bakterilerin seçimi çok önem arz etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre yağ içeriği ve protein içeriği yüksek atıklardan biyogaz üretimi gerçekleşmediği ancak hidrokarbonca zengin dut atığı, bayat un gibi atıkların biyogaz üretimini çok ciddi miktarda artırdığı bulunmuştur. Bunların dışında, mikroskop sonuçlarına göre biyogaz üretiminde bayat ekmeği gibi maya kültürü içeren atıkların kullanılması durumunda atıklarda bulunan mayanın uygun yaşam koşullarına ulaşarak metanojen bakterilerin gelişimlerini durdurduğu gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Lindsey, R., 2020. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. In: Dlugokencky E., <https://www.climate.gov/>, Erişim Tarihi: 05.05.2021.
2. Agency (EPA) EP 2021. Understanding Global Warming Potentials, <https://www.epa.gov/>, Erişim Tarihi: 02.05.2021.
3. Khalil, M.A.K., 2003. Atmospheric Methane its Role in the Global Environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 125-126, doi: 10.1016/j.agrformet.2003.09.004.
4. Sarıbiyık, O.Y., Özcanlı, M., Serin, H., Serin, S., Aydın K., 2010. Biodiesel Production from Ricinus Communis Oil and its Blends with Soybean Biodiesel. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 56(12), 811-816.
5. Agency, E., 2020. Energy in Sweden 2020 An Overview. Swedish Energy Agency, <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=174155>, Erişim Tarihi: 01.03.2021.
6. Eyl-Mazzega M.A., Mathieu, C., 2019. Biogas and Biomethane in Europe: Lessons from Denmark, Germany and Italy, 76.
7. Sif, B.S., Kofoed, W., Herrmann, A., Tengbjerg, I., Bernard, K.K., 2014. Experiences with Biogas in Denmark. Department of Management Engineering, 27.
8. Benato, A., Macor, A., 2019. Italian Biogas Plants: Trend, Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions. *Mdpi Energy*, 12(6), 979.
9. Gu, L., Zhang, Y.X., Wang, J.Z., Chen, G., Batty, H., 2016. Where is the Future of China's Biogas? Review, Forecast, and Policy Implications. *Pet. Sci. Springer*, 13(2016), 604-624.
10. Winquist, E., Rikonen, P., Pyysiäinen, J., Varho, V., 2019. Is Biogas an Energy or a Sustainability Product?-Business Opportunities in the Finnish Biogas Branch. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1344-1354.
11. Havrysh, V., Kalinichenko, A., Mentel, G., Olejarz, T., 2020. Commercial Biogas Plants: Lessons for Ukraine. *MDPI Energies*, 13(10), 2668.
12. Murray, B. C., Galik, C. S., Vegh, T., 2014. An Assessment of Market Potential in a Carbon-Constrained Future. *Nicholas Institute Report*, 59.
13. Nsair, A., Cinar, S. O., Alassali, A., Qdais, H. A., Kuchta, K., 2020. Operational Parameters of Biogas Plants: A Review and Evaluation Study. *Energies*, 13(15), 3761.
14. Qiliang, L., Zhang, Y., Miegheem, A.V., Chen, Y.C., Yu, N., Yang, Y., Yin, H., 2020. Design and Experiment of a Sun-powered Smart Building Envelope with Automatic Control. *Energy&Buildings*, 223, 110173, 1-17.
15. Patel, R.P., Nagababu, G., Kumar, S.V.V.A., Kachhwah, S.S., 2020. Wave Resource Assessment and Wave Energy Exploitation Along the Indian Coast. *Ocean Engineering* 217, 107834.
16. Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C., Xu, G., 2016. Enhanced Biogas Production from Sorghum Stem by Co-digestion with Cow Manure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(21), 9153-9158.
17. Ren, S., Dou, B., Ning, F., 2020. Geothermal Energy Exploitation from Depleted High-temperature Gas Reservoirs by Recycling CO₂: the Superiority and Existing Problems. *Geoscience Frontiers Pre Proof*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf>.
18. Zhoua, B., Or, S.W., Chan, K.W., Duan, H., Wu, Q., Wang, H., Meng, Y., 2021. Short-term

- Prediction of Wind Power and its Ramp Events Based on Semisupervised Generative Adversarial Network. *Electrical Power and Energy Systems*, 125(2), 106411.
19. India, B. Pi., 2021. Biogas: A Fit Option for Rural Energy. Erişim Tarihi: 05.06.2021.
 20. Abubaker, J., Risberg, K., Pell, M., 2012. Biogas Residues as Fertilisers—effects on Wheat Growth and Soil Microbial Activities. *Applied Energy*, 99, 126-134.
 21. Boreka, K., Romaniuk, W., 2020. Biogas Installation for Harvesting Energy and Utilization of Natural Fertilisers. *Scienco Agricultural Engineering*, 24(1), 1-14.
 22. Siddique, M.N.I., Khalid, Z.B., Ibrahim, M.Z.B., 2020. Effect of Additional Nutrients on Bio-methane Production from Anaerobic Digestion of Farming Waste: Feasibility & Fertilizer Recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103569.
 23. Valentinuzzi, F., Cavani, L., Porfido, C., Terzano, R., Pii, Y., Cesco, S., Marzadori, C., Mimmo, T., 2020. The Fertilising Potential of Manure-based Biogas Fermentation Residues: Pelleted vs. Liquid Digestate. *Heliyon*, 6(2), 03325, 1-15.
 24. Ferreira, S. F., Buller, L. S., Berni, M., Forster, C. T., 2019. Environmental Impact Assessment of end-uses of Biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 230, 613-621.
 25. Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Panahi, H.K.S., Nizami, A.S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., 2020. A Comprehensive Review on Recent Biological Innovations to Improve Biogas Production. Part 1: Upstream Strategies. *Renewable Energy*, 146, 1204-12020.
 26. Orlando, M.Q., Borja, V.M., 2020. Pretreatment of Animal Manure Biomass to Improve Biogas Production: A Review. *Energies*, 13(14), 3573, 1-25.
 27. Pavi, S., Kramer, L.E., Gomes, L.P., Miranda, L.A.S., 2017. Biogas Production from Co-digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Fruit and Vegetable Waste. *Bioresource Technology*, 228, 362-367.
 28. Chukeaw, T., Tiyyathaa, W., Jaroenpanona, K., Wittoon, T., Kongkachuichay, P., Chareonpanich, M., Faungnawakij, K., Yigit, N., Rupprechter, G., Seubsai, A., 2021. Synthesis of Value-added Hydrocarbons Via Oxidative Coupling of Methane Over MnTiO₃-Na₂WO₄/SBA-15 Catalysts. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1110–1122.
 29. Koniuszewska, I., Korzeniewska, E., Czatkowska, M., Harnisz, M., 2020. Intensification of Biogas Production Using Various Technologies: A Review. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6240–6258.
 30. Montingelli, M.E., Tedesco, S., Olabi, A.G., 2015. Biogas Production from Algal Biomass: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 961–972.
 31. Tsigkou, K., Zagklis, D., Tsafarakidou, P., Zapanti, P., Manthos, G., Karamitou, K., Zafiri, C., Kornaros, M., 2021. Expired Food Products and Used Disposable Adult Nappies Mesophilic Anaerobic Co-digestion: Biochemical Methane Potential, Feedstock Pretreatment and Two-stage System Performance. *Renewable Energy*, 168(7), 309-318.
 32. Thompson, T.M., Young, B.R., Baroutian, S., 2021. Enhancing Biogas Production from Caribbean Pelagic Sargassum Utilising Hydrothermal Pretreatment and Anaerobic Co-digestion with Food Waste. *Chemosphere*, 275, 130035.
 33. Jabłonski, S.J., Kułazynski, M., Sikora, I., Łukaszewicz, M., 2017. The Influence of Different Pretreatment Methods on Biogas Production from *Jatropha Curcas* oil Cake. *Journal of Environmental Management*, 203, 714-719.
 34. Huang, Q., Yu, Y., Wan, Y., Wang, Q., Luo, Z., Qiao, Y., Su, D., Li, H., 2018. Effects of Continuous Fertilization on Bioavailability and Fractionation of Cadmium in soil and its Uptake by Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Environmental Management*, 215, 13-21.
 35. Ma, Y., Yin, Y., Liu, Y., 2017. New Insights Into Co-digestion of Activated Sludge and Food Waste: Biogas Versus Biofertilizer. *Bioresource Technology*, 241, 448–453.
 36. Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Boshell, F., Saygin, D., Salgado, A., Seleem, A., 2018. Biogas for Road Vehicles Technology Brief. *The International*

- Renewable Energy Agency (IRENA). https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2017/mar/irena_biogas_for_road_vehicles_2017.pdf. Erişim Tarihi: 08.05.2021.
37. Niskanen, J., Magnusson, D., 2021. Understanding Upscaling and Stagnation of Farm-based Biogas Production in Sweden Through Transitional and Farming Logics. *Journal of Cleaner Production*, 279(3), 123235.
38. Pramanika, S.K., Sujaa, F.B., Zaina, S.M., Pramanik, B.K., 2019. The Anaerobic Digestion Process of Biogas Production from Food Waste: Prospects and Constraints. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100310.
39. Azadbakht, M., Ardebili, S.M.S., Rahmani, M., 2021. Potential for the Production of Biofuels from Agricultural Waste, Livestock, and Slaughterhouse Waste in Golestan Province, Iran. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01308-0>
40. Lanari, D., Franci, C., 1998. Biogas Production from Solid Wastes Removed from Fiih farm Effluents. *Aquatic Living Resources*, 11(4), 289-295.
41. Sarker, S., 2020. By-products of Fish-oil Refinery as Potential Substrates for Biogas Production in Norway: A Preliminary Study. *Results in Engineering*, 6, 100137, 1-8
42. Singh, R., Karki, A.B., Shrestha, J.N., 2008. Production of Biogas from Poultry Waste. *International Journal of Renewable Energy*, 3(1), 11-20.
43. Silva, T.H.L., Santos, L.A., Oliveira, C.R.M., Porto, T.S., Jucá, J.F.T., Santos, A.F.M.S., 2021. Determination of Methane Generation Potential and Evaluation of Kinetic Models in Poultry Wastes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 32, 101936, 1-8.
44. Quiroz, M., Varnero, M.T., Cuevas, J.G., Sierra, H., 2021. Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) in Areas with Limited Rainfall for the Production of Biogas and Biofertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125839, 1-16.
45. Kovács, E., Wirth, R., Maróti, G., Bagi, Z., Rákhely, G., Kovács, K.L., 2013. Biogas Production from Protein-Rich Biomass: Fed-Batch Anaerobic Fermentation of Casein and of Pig Blood and Associated Changes in Microbial Community Composition. *Plos One*, 8(10), 1-18.
46. Battista, F., Fino, D. Mancini, G., 2016. Optimization of Biogas Production from Coffee Production Waste. *Bioresource Technology*, 200, 884–890.
47. Cardoso, R.R., Neto, R.O., Dalmeid, C.S., Nascimento, T., Pressete, C.G., Azevedo, L., Martinod, H.S.D., Camerone, L.C., Ferreira, M.S.L., Barros, F., 2020. Kombuchas from Green and Black Teas have Different Phenolic Profile, Which Impacts Their Antioxidant Capacities, Antibacterial and Antiproliferative Activities. *Food Research International*, 128, 1-10.
48. Malik, W., Mohan, C., Annachhatre, A.P., 2020. Community Based Biogas Plant Utilizing Food Waste and Cow Dung. *Materials Today: Proceedings*, 28(3), 1910-1915.
49. Chuanchai, A., Ramaraj, R., 2018. Sustainability Assessment of Biogas Production from Buffalo Grass and Dung: Biogas Purification and Bio-fertilizer. *Springer Biotech*, 8(3), 2-11.
50. Spence, A., Madrigal, E.B., Patil, R., Fernández, Y.B., 2019. Evaluation of Anaerobic Digestibility of Energy Crops and Agricultural Byproducts. *Bioresource Technology Reports*, 5, 243–250.
51. Feng, L., Ward, A.J., Guixé, P.G., Moset, V., Møller, H.B., 2018. Flexible Biogas Production by Pulse Feeding Maize Silage or Briquetted Meadow Grass into Continuous Stirred Tank Reactors. *Biosystems Engineering*, 174, 239-248.
52. Comino, E., Rosso, M., Riggio, V., 2009. Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Whey Mix. *Bioresource Technology*, 100(21), 5072–5078.
53. Xue, S., Wang, Y., Lyuc, X., Zhao, N., Song, J., Wang, X., Yang, G., 2020. Interactive Effects of Carbohydrate, Lipid, Protein Composition and Carbon/nitrogen Ratio on Biogas Production of Different Food Wastes. *Bioresource Technology*, 312, 123566.
54. Hirakata, Y., Hatamoto, M., Oshiki, M., Watari, T., Araki, N., Yamaguchi, T., 2020. Food Selectivity of Anaerobic Protists and

- Direct Evidence for Methane Production Using Carbon from Prey Bacteria by Endosymbiotic Methanogen. *ISME*, 14, 1873–1885.
55. Cheng, J., Ding, L., Lin, R., Yue, L., Liu, J., Junhu, Zhou, K.C., 2016. Fermentative Biohydrogen and Biomethane Co-production from Mixture of Food Waste and Sewage Sludge: Effects of Physiochemical Properties and Mix Ratios on Fermentation Performance. *Applied Energy*, 184, 1-8.
 56. Lu, X., Jin, W., Xue, S., Wang, X., 2017. Effects of Waste Sources on Performance of Anaerobic Codigestion of Complex Organic Wastes: Taking Food Waste as an Example. *Nature*, 7(1), 15702, 1-9.
 57. Diamantis, V., Eftaxias, A., Stamatelatou, K., Noutsopoulos, C., Vlachokostas, C., Aivasidis, A., 2021. Bioenergy in the Era of Circular Economy: Anaerobic Digestion Technological Solutions to Produce Biogas from Lipid-rich Wastes. *Renewable Energy*, 168, 438-447.
 58. Rasit, N., Idris, A., Harun, R., Azlina, W., Ghani, W.A.K., 2015. Effects of Lipid Inhibition on Biogas Production of Anaerobic Digestion from Oily Effluents and Sludges: An Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 351–358.
 59. Rahardiyan, D., 2018. Antibacterial Potential of Catechin of Tea (*Camellia sinensis*) and its Applications. *Food Research*, 3(1), 1-6.
 60. Lia, W., Khalida, H., Zhua, Z., Zhangb, R., Liua, G., Chena, C., Thorin, E., 2018. Methane Production Through Anaerobic Digestion: Participation and Digestion Characteristics of Cellulose, Hemicellulose and Lignin. *Applied Energy*, 226, 1219–1228.
 61. Uzun, B.B., Varol, E.A., Ates, F., Özbay, N., Pütün, A. E., 2010. Synthetic Fuel Production from Tea Waste: Characterisation of Bio-oil and Bio-char. *Fuel*, 89, 176–184.
 62. Srinivasan, P., Smolke, C.D., 2020. Biosynthesis of Medicinal Tropane Alkaloids in Yeast. *Nature*, 585, 614-619.

Bir Denim Konfeksiyon İşletmesinde Otomasyon Sistemlerinin, İş Sürelerindeki İyileşmeye Olan Etkisinin Değerlendirilmesi

Hilal BİLGİÇ*¹

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt Meslek Yüksek Okulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Malatya

Geliş tarihi: 03.05.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Bu çalışmada, bir denim konfeksiyon işletmesinde iş istasyonlarına göre, elle ve otomatik olarak yapılan işlerin zaman etüdü yapılmış ve kıyaslanmıştır. Dikim bölümünde işlem zorluğu ve işlem süresinin uzunluğu nedeni ile otomatlara ihtiyaç duyulan işlemler de etüt edilmiştir. Yapılan etütler sonucu dikimhanede kullanılan otomatlarda işlem süresi açısından en düşük iyileşme yüzdesi %28,94 ile rivet çakma otomatında (bu işlem, ürün yıkama öncesi yapıldığından, otomat, dikimhane departmanı içindedir), en yüksek iyileşme yüzdesi ise %88,57 ile kemer takma otomatında kaydedilmiştir. Denim konfeksiyona has kuru işlemlerde ise, 13 adet numunenin üzerlerindeki işlemlerin hem manuel, hem de otomatik makinelerdeki işlem süreleri etüt edilmiştir. Elde edilen verilere göre zaman açısından iyileşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Numunelere uygulanan kuru bitim işlemlerinde ise zorluk derecesine göre işlem sürelerinde %25,52 ila %56,25 arasında iyileşme görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Denim konfeksiyon, Otomasyon, Dikim otomatları, Lazer ile kuru işlemler

Evaluation of the Effect of Automation Systems on Improvement in Work Period in a Denim Apparel Plant

Abstract

In this study, the time study of manual and automatic work done by workstations in a denim garment business was compared. In the sewing department, the processes that require automatic machines due to the difficulty of processing and the length of the processing time were also studied. As a consequence of the studies performed, the lowest improvement percentage in terms of processing time was recorded in rivet fastening automat with 28.94% (this process was done before washing the product, so it was in the sewing department), the highest improvement percentage was recorded in the belt fastening automat with 88.57%. In dry processes specific to denim apparel, the processing times of the processes on 13 samples were investigated both in manual and automatic machines. Based on the data obtained, the improvement percentages in terms of time were calculated. In the dry finishing processes applied to the samples, an improvement between 25.52% and 56.25% was observed in the processing times depending on the difficulty.

Keywords: Denim manufacturing, Automation, Sewing automat, Dry laser processes

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Hilal BİLGİÇ, hilal.bilgic@ozal.edu.tr

1. GİRİŞ

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla ilerlediği günümüzde, insanlardaki hız ve zaman algısı da farklı bir boyuta gelmiştir. Haberleşme, ulaşım, tedarik, üretim gibi birçok alanda teknolojinin imkânlarının kullanılması, dev sanayi kuruluşlarından en sade bireye kadar her kesimde işlemlerin hızlı yapılması beklentisini oluşturmuştur. Bu bağlamda, imalattan depolamaya, naklieden dağıtımına birçok alanda ileri bilgisayar teknolojilerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir [1].

Artan dünya nüfusuyla birlikte insanların talepleri de gün geçtikçe çoğalmıştır. Bu nedenle daha çok ürünü, mümkün olduğunca kısa sürede üretme, ürünlerin uygun şartlarda nakliyesi ve depolanması ve akabinde talep eden kesime arz edilmesi için teknolojinin imkânlarından yararlanılması gereği duyulmuştur. Ancak tüm bu işlemlerin sadece hızlı yapılması yeterli olmamakta, aynı zamanda hatasız bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Yapısı gereği insan hataya açık bir varlık olduğu için, hızlı çalışması gereken sistemlerin minimum hata ile ve seri bir şekilde ilerlemesine yönelik makineleşme çalışmaları artmıştır. Sürdürülen araştırmalar ve ilerleyen teknoloji sayesinde günümüzde birçok sistemin yürütülmesi ve kontrol edilmesi otomasyon sistemleri tarafından yapılabilecek hale gelmiştir [1]. Bu bağlamda, karşımıza çıkan ve bir işin insan ile makine arasında paylaşılması olarak tanımlanan terime otomasyon denilmektedir. Endüstriyel otomasyon ise, üretim işlemlerinin hiç insan müdahalesi olmadan ya da çok az müdahale ile sürdürülmesi olarak tanımlanabilir [2]. Otomasyonun düzeyi bir sistemde işin paylaşım yüzdesi ile belirlenir. Sistemde insan gücü yoğun ise “yarı otomasyon”; makine gücü yoğun ise “tam otomasyon” olarak adlandırılır.

Tekstil sektöründe de otomasyonla ilgili bazı akademik çalışmalara değinecek olursak;

Erol ve diğerleri, farklı bölgelerde hizmet vererek aynı ürün üreten ve benzer üretim kapasitesine

sahip farklı işletmelerden alınan verilerle karşılaştırmalı bir analiz yapmış, maliyeti etkileyen unsurlar ve bu unsurların etki oranları tespit etmişlerdir. Maliyet kalemleri içerisinde malzeme ve aksesuar maliyetlerinden sonra ikinci sırada yer alan dikim bölümü işçilik maliyetlerine etki eden faktörler incelemişler, bu faktörlerle ürün birim maliyeti arasındaki bağlantıların ortaya çıkarılmasına çalışmışlardır [3]. Bu verilerde dikimhane bölümündeki otomasyon ihtiyacını açıkça ortaya koymaktadır.

Bilgiç, 2017 yılında denim konfeksiyonda otomasyon üzerine yapmış olduğu çalışmada kuru işlem uygulanmış beş numune üzerinde iyileşme oranlarının %50'ye yakın olduğunu tespit etmiştir [4].

Yazgan Bulgun ve diğerleri hazır giyim sektöründe üretim maliyetlerini hesaplamak için web tabanlı otomasyon yazılımı geliştirmişlerdir [5].

Chin ve arkadaşları makalelerinde, Hong Kong'da otomasyon sistemlerinin benimsenmesine ve otomasyon stratejisi seçimlerinin belirlenmesine ilişkin deneysel bir çalışmanın bulgularını incelemişlerdir. Nispeten küçük örneğe rağmen, kanıtlar birçok giyim üreticisinin geleneksel operasyonlardan otomasyon sistemlerinin, araçlarının ve hizmet unsurlarının (örneğin tasarım, planlama, üretim ve pazarlama) kullanımını içeren modern operasyonlara geçtiğini ortaya koymuşlardır [6].

Li ve arkadaşları Çin'in Pearl River Delta bölgesinde yaptıkları araştırmada; tekstil sektöründe otomasyonla ortaya çıkan işgücü değişikliklerini ortaya koymuşlardır. Genel olarak, emek yoğun endüstrilerdeki otomasyonun, işçilik maliyetlerini düşürdüğünü ve şirketlerin üretim süreçlerini iyileştirmelerine yardımcı olduğunu, niteliksiz işçi sayısının azalırken nitelikli işçi sayısının arttığını vurgulamışlardır [7].

Huang ve arkadaşları çalışmalarında Gu ve

diğerlerinin çalışmasının tam aksi yönde bir sistem geliştirip üç boyutlu giysi formları bloklar haline getirip iki boyutlu kalıplar elde etmişlerdir. Otomasyonun ürün geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırdığına ve moda ürünlerinin pazara sunulma süresini kıaldığına vurgu yapmışlardır [8].

Cömert ve arkadaşları, Adana'da seçilmiş bir konfeksiyon işletmesinde farklı desenli iki çift pantolonun dikim prosesini incelemişler ve söz konusu ürünlerin proses analizini yapmışlardır. Giysilerin dikim hattı için zaman ölçümü ve proses analizi yapılmıştır. Çalışmada Pitch time hesaplanmış, Pitch şeması oluşturulmuş, proses analizinde dar boğazlar tespit edilmiş ve ilgili çözüm önerileri sunulmuştur [9].

Kumaş ve arkadaşları, seçilmiş bir konfeksiyon işletmesinde İş Etüdü çalışması yapmıştır. Çalışma kapsamında bir pantolon üretim süreci incelenmiştir. Çalışmada amaç; konfeksiyon işletmelerinde seçilmiş bir ürün için üretimdeki tüm işlerin dizgisel olarak kaydedilmesi ve verimsiz sürelerin ortadan kaldırılmasının araştırılmasıdır. İş etüdü metodu seçilen pantolon üretim süreci için konfeksiyon işletmesinin tüm proseslerine uygulanmıştır.

İşletmede kullanılan makinelerde veya işletme genel tesis yerleştirmede herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Etüt işlemi proseslerde uygulanan işlemler üzerinde gerçekleştirilmiş olup işlem sıraları değiştirilmiş veya işlemler birleştirilmiştir. Çalışmada iş etüdü çalışmalarında kullanılan iş akış şemaları ile iki el süreç şemaları kullanılarak iyileştirilmesi gereken işlemler belirlenmiş ve önerilen sistem oluşturulmuştur. Her bir birimin mevcut sistemi incelenerek dikim bölümünde iyileştirilme yapılmasına karar verilmiştir [10].

Ünal ve arkadaşları çalışmalarında klasik dikiş makineleri ile dikiş otomatları üretim yöntemlerini ekonomiklikleri açısından karşılaştırılarak en uygun üretim yöntemi önerileri ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında kemer takma, etiket dikme, fleto cep takma, cep kapağı dikme,

pantolona arka cep takma ve kemere köprü dikme otomatları kullanmışlardır.

Otomatların çoğunluğu işletmeyi birinci yılında kara geçirirken, sadece bir tanesi (cep kapağı dikme otomatı); makine değerinin çok yüksek olması nedeniyle ancak beşinci yılın sonunda kârlı olabilmıştır [11].

Çalışma Malatya'da, kümeleşmenin yaşanmaya başladığı denim ürün üretiminde öncü, Baykanlar Denim'de yapılmıştır. İşletme bölgemizde otomasyon sistemlerini en iyi uygulayan denim konfeksiyon işletmesidir. Bu çalışmanın asıl amacı da denim konfeksiyonun dar boğazlarını tanımlamak, işletmede bu dar boğazlar hangi otomasyon sistemleri ile aşılmış ve iyileşme oranları ne orandadır, bunların tespitini yapmak ve eskiden tamamen el işçiliğine dayanan kuru işlemlerin otomasyon sonucu geldiği aşamayı ortaya koymaktır. Bu çalışmada özellikle bu işlemlere iş zaman etüdü yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada 12 adet farklı 5 cep denim pantolon ve 1 adet ceketten oluşan bir grup giysi için, denim konfeksiyondaki iş istasyonlarına göre seçilmiş işlerin manuel ve otomasyon ile zaman etüdü uygulamaları incelenmiştir.

Modelhane ve kesimhane bölümünde kullanılan otomasyon sistemleri için manuel ve otomatik serim ve kesim yapılan operasyonlar, seçilmiş 5 cep denim pantolon için kıyaslanmıştır.

Dikimhanede ise günlük üretim akışını bozmadan işletmede aynı işlemleri yapan otomatlara ve mekanik-manuel işlemlere iş zaman etüdü yapılmıştır. Bu işlemler; arka cep takma, köprü takma, kemer takma, etiket takma, cep ağzı kıvrırma ve rivet çakmadır. Diğer dikim aşamalarında otomat kullanılmadığı için kıyaslama yapılamamıştır.

Bir Denim Konfeksiyon İşletmesinde Otomasyon Sistemlerinin, İş Sürelerindeki İyileşmeye Olan Etkisinin Değerlendirilmesi



Şekil 1. Çalışmada kullanılan numuneler

Denim konfeksiyona has kuru işlemlerde ise denim ürünlerden 13 adet numune seçilmiş, üzerlerindeki kuru işlemlerin hem manuel, hem de otomatik makinelerdeki işlem süreleri etüt edilmiştir. Her işlem 10'ar kere tekrarlanmış ve 10 ölçümün ortalaması alınmıştır. Elde edilen verilere göre iyileşme yüzdeleri hesaplanmıştır.

Çalışmada dikim bölümündeki otomatlardan ve düz makinelerden alınan işlem süreleri denim konfeksiyon işletmesinde rutin yapılan iş-zaman ölçümlerinden alınan değerlerdir.

Denim bitim işlemleri zaman etütleri için ise 12 adet beş cep denim pantolon ve 1 adet denim mont numune olarak kullanılmıştır. Toplam 13 numunenin üzerinde farklı kuru işlemler vardır. Numunelerin üzerindeki kuru işlemlerin görülebileceği görüntüler Şekil 1'de verilmiştir.

2.2. Metot

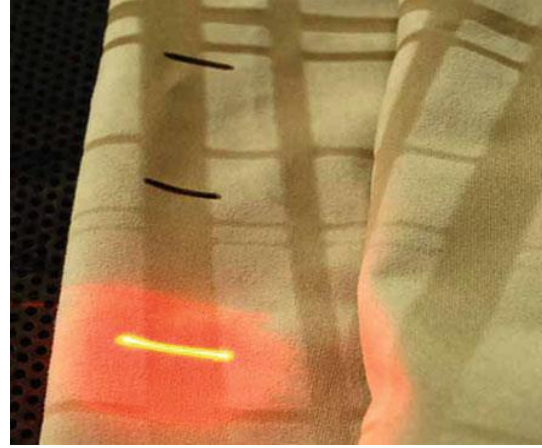
Kesimhane departmanında numune ve az sayıda deneme üretimleri için manuel ve yarı otomatik serim ve kesim işlemleri yapılmaktadır. Üretim için ise otomatik kesim sistemi (Şekil 2) kullanılmaktadır.



Şekil 2. Otomatik kesim sistemi [12]

Lazer teknolojisi de otomatik kesim sistemlerinden biridir. Çalışma yapılan işletmede lazer kesim teknolojisi de kullanılmıştır.

Lazer teknolojisi ile hassas ve temiz kesimler elde edilebilir. Kumaş, Şekil 3'te gösterildiği gibi malzemeler üzerinde yıpranmış kenarlar veya kıvrımlar olmaksızın bir seferde bir veya birkaç katmanı hem karmaşık hem de hassas bir şekilde kesilebilir [13].



Şekil 3. Lazer kesim teknolojisi ile açılmış ilik [13]

Dikim bölümü, en fazla emek yoğun bölüm olarak manuel işlemlerin zaman etüdü için de en uygun bölümdür. Dikimhane ve denim bitim işleri departmanlarında aynı işlemler hem düz makinelerde hem de otomatik makinelerde yaptırılarak zaman etüdü analizi yapılmıştır.

Çalışmada kıyaslama yapılan iyileşme oranları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$\text{İyileşme oranı} = \frac{\text{Manuel işlem süresi} - \text{Otomatlarda işlem süresi}}{\text{Manuel işlem süresi}} \times 100$$

Hesaplama kullanılan etüt değerleri, 10 etüt değerinin ortalaması alınarak ve %85 verimlilik dikkate alınarak bulunmuştur. Ölçümlerde dijital kronometre kullanılmıştır. Zaman etütü yapılan işlemler aşağıda verilmiştir:

- Arka cep takma
- Köprü takma
- Kemer takma
- Etiket takma
- Cep ağzı kıvrırma
- Rivet çakma

Çalışmada etüt edilen kuru işlemler ise aşağıda açıklanmıştır. Kullanılan makineler Şekil 4 ve 5'de verilmiştir.

Bıyık ve Zımpara: Bıyık işlemi çizgisel, zımpara ise bölgeseldir. Seçilen modele göre, manuel

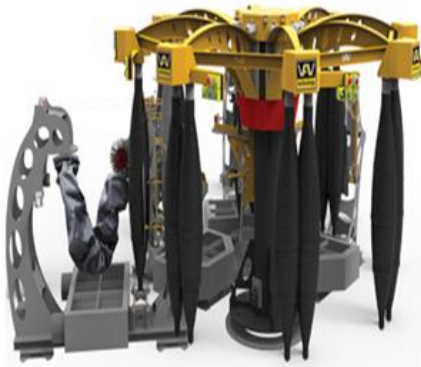
olarak zımpara ile aşındırma yapılır. Otomasyonda ise rengi açılacak yerler lazer makinelerinin beynine bilgisayar sistemleri ile işlenerek, o kısımlar yakılır.

Yıpratma: Denim ürünlerde uygulandığı bölgeyi kullanımdan dolayı yıpranmış görünümü vermeyi sağlayan işlemdir. Otomasyonda yıpratma, bıyık ve zımparada olduğu gibi yıpratılacak yerler lazer makinelerinin beynine bilgisayar sistemleri ile işlenerek, o kısımlar yakılır. Yıpratmanın derecesine göre lazerin yakıcılığı ve işlem süresi ayarlanabilir.

Mamül haldeki denim ürüne bıyık işlemi genelde yıkama işleminden önce ve dik lazer makinelerinde yapılır. Yıpratma işlemi ise yıkama işleminden sonra ve tablalı yatay lazer makinelerinde yapılır.



Şekil 4. Sprey robotu [14]



Şekil 5. Zımpara robotu [14]

3. BULGULAR

Farklı modellerde denim ürünlerden çalışma yapılan konfeksiyon işletmesinde serim ve kesim işlemlerinin manuel ve otomatik işlemlerinin zaman etüdü yapılmış ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Aynı işletmede kalıp hazırlama işlemi CAD sistemleri ile yapıldığından kalıp hazırlama için elle hazırlanmış pastal planı hazırlama süreleri kıyaslanamamıştır. Fakat daha önce yapılmış çalışmalardan CAD sistemlerinin zaman açısından çok büyük bir avantaj sağladığı bilinmektedir [15].

Kesimhanede ise hem manuel hem de otomatik kesim sistemi ile kesim yapılmaktadır. Çalışmada kullanabilmek için; kesimhanede 120 parçalık 8 metre pastal planı her iki şekilde de 35 kat serilmiş ve kesimi yapılmıştır. Veriler Çizelge 1’de verilmiştir.

Otomatik serim ve kesim sistemlerinde serim uzunluğu, kalıp parça sayısı ve kat sayısı bölümde çalışan sayısını değiştirmemekte, işletme bu otomat için 8 saatlik vardiyada 2 kişi çalıştırmaktadır. Oysa manuel serim ve kesimde serim uzunluğu, kalıp parça sayısı ve kat sayısının artması çalışanları zorlamakta, işlem süresini uzatmakta, bazen eleman takviyesi gerekmektedir.

Çizelge 1’de manuel serim ve kesim operasyonları ile otomasyon sistemlerinin kullanılması arasında işçilik, süre ve maliyet açısından çok büyük iyileşmeler olduğu açıkça görülmektedir. Manuel serim ve kesim işleminin maliyeti, otomatik serim ve kesim maliyetinin tam 30 katı çıkmıştır. Otomatik serim makineleri pahalı makineler olsa da konfeksiyon sektöründe rekabet edebilirliği arttırdığından, özellikle ihracat yapan işletmelerin teslimat sürelerini kısaltabilmek için yatırım yaptığı sistemlerdir. Bu kıyaslamada bize otomatın kendini kısa sürede amorti edeceğini göstermektedir.

Çizelge 1. Kesimhanede manuel ve otomasyonla yapılan operasyonların kıyaslanması

	Manuel serim-Kesim	Otomatik serim-Kesim
Serim için çalışan sayısı	2 kişi (3 saat)	1 kişi (30 dk)
Kesim için çalışan sayısı	6 kişi (4 saat)	1 kişi (30 dk)
Serim+Kesim için harcanan süre	3+4=7 saat	0,5+0,5=1 saat
1 çalışanın 1 saatlik maliyeti *	21 TL	21 TL
Örnek işin maliyet hesabı	(2*3+6*4)*21TL	(1*0,5+1*0,5)*21TL
Toplam maliyet	630 TL	21 TL

* İşçilik maliyeti 2019 giderlerine göre yaklaşık olarak sadece kıyaslama yapabilmek için verilmiştir.

Çizelge 2’de ise dikimhanede hem manuel hem de otomatlarla yapılan bazı operasyonların süreleri verilmiş ve iyileşme oranları hesaplanmıştır. Özellikle kemer takma operasyonunda %90’a varan iyileşmeler gerçekleşmektedir. En az iyileşme yüzdesi ise %40,47 ile etiket takma ve %28,94 ile rivet çakma operasyonlarında görülmüştür. Her ikisi de aksesuar takma işlemidir. Dikilen

etiketlerin ve rivetlerin küçük aksesuarlar olması otomatlar da bile işlemi zorlaştırmaktadır. Dikiş otomatları sayesinde üretim süreleri kısalarak işçilik maliyeti aşağı çekilmiş olur, kalitede standartlaşma sağlanır, emeğe bağımlılık azalır ve özellikle zor ve tehlikeli işleri otomatlar yaptığından iş kazalarında azalmalar meydana gelir.

Çizelge 2. Dikimhanede kullanılan otomatlara ait zaman açısından iyileşme oranları

Operasyon	Otomatlarda işlem süresi (dk)	Manuel işlem süresi (dk)	Otomasyon hedef (adet)	Manuel hedef (adet)	İyileşme oranı (%)
Arka cep takma	0,45	1,95	1020	235	76,92
Köprü takma	0,26	1,45	1795	317	82,07
Kemer takma	0,32	2,80	1434	164	88,57
Etiket takma	0,25	0,42	1836	1093	40,47
Cep ağzı kıvrırma	0,09	0,21	5100	2186	57,14
Rivet çakma	0,27	0,38	1700	1208	28,94

*Hesaplamalar %85 Verim ve 540 dk (tek vardiya) çalışma süresi baz alınarak yapılmıştır.

Çizelge 3’e göre işletmelerin otomasyon sayesinde iş gücü oranının bazı operasyonlarda %50 iyileşmenin üzerine çıktığını söyleyebiliriz. Yani bazı operasyonlarda işlem süreleri neredeyse yarıya düşmüştür. İyileşme yüzdesinin en yüksek olduğu operasyonların yıpratma olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise manuel olarak bu işlemin çok zor ve uzun sürmesidir. Özellikle yüksek onzlu denim

kumaşlarda yıpratma yapıp kumaşta yırtık oluşturmak çok zordur. Oysa bıyık ve zımpara işlemleri yüzeysel işlemlerdir. Manuel olarak kıyaslandığında yıpratmaya göre daha kolay operasyonlardır. Ortalama iyileşme yüzdesi ise %40 civarındadır. Verim iyileşmesinin yanı sıra otomasyon kullanımı ile kalite konusunda da iyileşmeler görülmüştür.

Çizelge 3. İşletmede kuru işlemler bölümünde otomasyon ve manuel işlem sürelerinin kıyaslanması

	Manuel yıpratma birim zamanı (dk)	Otomasyon yıpratma birim zamanı (dk)	İyileşme oranı (%)	Manuel bıyık ve zımpara birim zamanı (dk)	Otomasyon bıyık ve zımpara birim zamanı (dk)	İyileşme oranı (%)
Numune 1	2,15	1,1	48,83	yok	yok	-
Numune 2	0,54	0,3	44,44	1,24	0,85	31,45
Numune 3	0,62	0,45	27,42	yok	yok	-
Numune 4	1	0,52	48	1,45	1,08	25,52
Numune 5	0,6	0,34	43,33	1,6	1,14	28,75
Numune 6	0,6	0,32	46,67	yok	yok	-
Numune 7	yok	yok	-	2,1	1,35	35,71
Numune 8	yok	yok	-	2,06	1,25	39,32
Numune 9	0,75	0,4	46,67	yok	yok	-
Numune 10	1,42	0,75	47,18	yok	yok	-
Numune 11	yok	yok	-	1,2	0,76	36,67
Numune 12	0,8	0,35	56,25	yok	yok	-
Numune 13	yok	yok	-	1,5	0,86	42,67

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Denim konfeksiyon işletmelerini diğer konfeksiyon işletmelerinden ayıran en önemli özellik; denim konfeksiyon işletmelerinde ürüne yüksek katma değer katan efektlerin bir başka ifade ile ıslak ve kuru işlemlerin uygulanmasıdır. Islak işlemler büyük kazanlar içinde çok sayıda ürüne aynı anda uygulandığından zaman açısından çok sıkıntı yaşatmaz. Fakat kuru işlemler (zımpara, bıyık ve yıpratma gibi) kısa bir süre öncesine kadar tamamen manuel olarak yapılmaktaydı. Bu işlemler manuel yapıldığında çok zaman kaybına yol açmakta, standart bir üretim yapılamamasına neden olmaktadır. İşletmeler müşterilerine termin verirken direkt ürün üzerindeki kuru işlemleri dikkate almaktaydı. Üstelik denim modası gittikçe daha çok zımpara, daha çok yıpratma ve hatta daha çok yırtık talep etmekteydi. Tüm bunlar da özellikle kuru işlemlerde otomasyonu zorunlu kılmıştır.

Bu çalışma neticesinde, konfeksiyon işletmelerinin otomasyon sayesinde iş gücü oranının ortalama

%50 arttığını söyleyebiliriz. Verim iyileşmesinin yanı sıra otomasyon kullanımı ile kalite konusunda da iyileşmeler görülmüştür. Otomasyon kullanımı ile daha standart ürünler çıkmaktadır. Otomasyon kalifiye personel ihtiyacını azaltmış, operatörlerin yetkinlik kazanma süresini kısaltmıştır.

Otomasyonun avantajlarını kısaca kalitede artış, zaman tasarrufu, üretim maliyetinin düşmesi, iş kazalarında azalma dolayısı ile rekabet edilebilirliğinin artması olarak özetleyebiliriz.

Otomasyon sistemlerinin avantajlarının fazla olmasının yanında dezavantajları da var. Bunlar; İlk montaj maliyetinin yüksek olması (Maliyet, uzun zamanda çoğu otomasyon sistemlerinde kendini amorti etmektedir), çalışan sayısında azalma (İşgücü istihdam oranının düşmesi), yatırım maliyetlerinin yükselmesidir.

Bunların yanı sıra, özellikle lazer işlemlerinde, doğal görünümü tercih eden, bu yüzden işlemlerim manuel yapılmasını isteyen denim markaları da mevcuttur.

5. TEŞEKKÜR

Çalışmadaki numunelere ve çalışmama imkan sağladıkları için Baykanlar Tekstil'e (MALATYA) teşekkürü bir borç bilirim.

6. KAYNAKLAR

1. Öylek İ., 2014. Hareketli Bant İçeren Bir Otomasyon Prosesinin Veri Matris Kodu Teknikleri Kullanılarak Gerçeklenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 92.
2. Erol, E., Paşayev, N., 2014. Küçük ve Orta Ölçekli Konfeksiyon İşletmelerinde Üretim Maliyetlerinin Dikim Bölümü Üretim Şartları Açısından Analizi. Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 24(1), 134-140.
3. Ciğer, M., 2010. Bilgisayar Kontrollü, İnternet Destekli Sera Otomasyonu. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri A.B.D, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 146.
4. Bilgiç, H., 2017. Denim Konfeksiyonda Otomasyon Uygulamaları. 2. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi (IMSEC 2017) Tam Metin Bildiri, Adana.
5. Yazgan, B.E., Kut, A., Baser, G., Kasap, M., 2002. Web Based Automation Software for Calculating Production Costs in Apparel Industry. Conference: Advances in Information Systems, Second International Conference, ADVIS 2002 October 23-25, Izmir.
6. Chin, K.S., Pun, K.F., Lau, H., Leung, Y.S., 2004. Adoption of Automation Systems and Strategy Choices for Hong Kong Apparel Practitioners. Int J Adv Manuf Technol, 24, 229–240. DOI 10.1007/s00170-003-1592-3.
7. Li, X., Hui, E.C., Lang, W., Zheng, S., Qin, X., 2019. Transition from Factor-driven to Innovation-driven Urbanization in China: A Study of Manufacturing Industry Automation in Dongguan City. China Economic Review. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2019.101382>.
8. Huang, H.Q., Mok, P.Y., Kwok, Y.L., Au, J.S., 2012. Block Pattern Generation: from Parameterizing Human Bodies to Fit Feature-Aligned and Flattenable 3D Garments. Computers in Industry, 680–691.
9. Cömert, M., Kadem, D.F., 2015. Dikim Bandında Bir Proses Analizinin Uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 151-166.
10. Kumaş, Z., Sabır, C.E., Baykal, D.P., 2016. Konfeksiyon İşletmesinin Verimliliği için İş Etüdü Tekniği Kullanımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 175-190.
11. Ünal, B.Z., Erdoğan, M.Ç., Öndoğan Z., 2005. Konfeksiyon İşletmelerindeki Makinelerin Kârlılık Üzerine Etkileri. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(2), 249-255.
12. <http://www.serkonmakina.com> (Ekim-2019)
13. Vidyasagar, P.V., 2000. Encyclopedia of textiles—Textile Automation, Vol 3, 1st Edn. Mittal Publications, New Delhi, India, 169.
14. <http://www.vavtechnology.com> (Eylül-2019)
15. Bilgiç, H., 2015. Örme Konfeksiyonda Kumaş Eni ile Kumaş ve Model Türlerinin Pastal Resmi Verimliliğine Etkileri. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği A.B.D, Doktora Tezi, Adana, 326.

Ce-Mn-TiO₂/Kordiyerit Katalizörünün SCR Aktivitesine Ca İçerikli Küllerin Etkisi

Ali KESKİN*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 20.05.2020 Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Bu çalışmada seryum (Ce), mangan (Mn) ve titanyum dioksit (TiO₂) elementlerini içeren katalizörün Ca içerikli küllerin varlığında azot oksitlerin (NO_x) seçici katalitik indirgenmesine (SCR) etkisi araştırılmıştır. Katalizör üretiminde destek materyal olarak kordiyerit kullanılmış olup katalizör sentezinden önce yüzey alanının artırılması amacıyla %50'lik okzalik asit çözeltisiyle muamele edilmiştir. Daldırma yöntemiyle üretilen katalizörün yüzey özellikleri BET, SEM ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Sentezlenen katalizörün BET yüzey alanının 30,38 m²/g olduğu tespit edilmiştir. Ca-Ce-Mn-TiO₂/Kordiyerit katalizörünün aktivitesi 200 ile 280 °C sıcaklık aralığında, 1 kW, 2kW ve 3 kW motor yüklerinde araştırılmıştır. Katalitik aktivitenin sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı, motor yükü artışına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. 280 °C sıcaklıkta ve 3 kW motor yükünde elde edilen en yüksek NO_x dönüşüm oranının %82,2 olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seçici katalitik indirgeme, Dizel motor, Katalizör, NO_x

Effect of Ca Containing Ashes on SCR Activity of Ce-Mn-TiO₂/Cordierite Catalyst

Abstract

In this study, the effect of the catalyst containing cerium (Ce), manganese (Mn) and titanium dioxide (TiO₂) elements on selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxides (NO_x) in the presence of Ca containing ashes was investigated. Cordierite was used as a support material in the production of catalyst and it was treated with 50% oxalic acid solution in order to increase the surface area before catalyst synthesis. Surface properties of the catalyst produced by dipping method were determined by BET, SEM and XRD analysis. It was determined that the BET surface area of the synthesized catalyst was 30.38 m²/g. The activity of Ca-Ce-Mn-TiO₂/Cordierite catalyst was investigated in the temperature range of 200 to 280 °C at 1 kW, 2kW and 3 kW engine loads. It was determined that the catalytic activity increased due to the increase in temperature and decreased due to the increase in engine load. It was determined that the highest NO_x conversion ratio obtained at 280 °C and 3 kW motor load was 82.2%.

Keywords: Selective catalytic reduction, Diesel engine, Catalyst, NO_x

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ali KESKİN, akeskin@edu.tr

1. GİRİŞ

Hava kirliliğinin nedenlerinden biri olan azot oksitler (NO_x) fotokimyasal duman, sis ve asit yağmuru gibi birçok çevresel soruna neden olmaktadır. NO_x oluşumunun ana kaynağı dizel motor emisyonlarıdır.

Seçici katalitik indirgeme (SCR) NO_x emisyonlarının azaltılmasında en etkili yöntemlerden biridir [1,2]. SCR sistemlerinde katalizör yardımıyla NO_x indirgenme reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından düşük sıcaklıkta yüksek aktiviteye sahip katalizörler araştırılmıştır. Ticari olarak elde edilen V₂O₅-WO₃/TiO₂ katalizörü SCR sistemlerinde uzun zamandan beri kullanılan katalizörlerden biridir. Ancak bu katalizörün sadece 300 ile 400 °C sıcaklık aralığında daha iyi aktivite göstermesi ve bu katalizörden kaynaklanan vanadyum bileşiklerinin toksik etkisi sebebiyle kullanımı sınırlanmıştır [3]. Ag/Al₂O₃ özellikle etanol indirgeyici ile yüksek aktivite göstermesi nedeniyle SCR katalizörü olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu katalizör düşük sıcaklıkta yüksek aktivite gösterememektedir [4].

Seryum (Ce) içerikli katalizörler düşük sıcaklıkta yüksek NO_x indirgeme özelliği nedeniyle gelecek vadetmektedir [5]. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından Ce içerikli katalizörler kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Zhang ve arkadaşları CeO₂-Fe₂O₃/Al₂O₃ katalizörü ile yaptıkları araştırmada Ce:Fe oranı 1:0,35 olduğunda NO dönüşüm oranının yaklaşık olarak %90'a ulaştığını bildirdiler [6].

Son yıllarda düşük sıcaklık performansının çok iyi olması nedeniyle mangan oksitleri içeren katalizörler tercih edilmektedir [3]. Yao ve arkadaşları Cu-SSZ-39 zeolitlerine Ce ve Mn elementlerinin etkisini iyon değiştirme yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Her iki elementinde katalizör aktivitesini arttırdığını bulmuşlardır [7]. Yang ve arkadaşları aktif karbon destekli kütlece %5 Mn-Ce-Fe oksitlerini içeren katalizörün 125°C sıcaklıkta %90'ın üzerinde NO dönüşümü sağladığını tespit etmişlerdir [8]. Youn ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Mn-Ce/TiO₂

katalizörünün düşük katalitik aktivite göstermesine rağmen Mn-Ce/TiO₂-CNT katalizörlerinin 140-240 °C'de üstün katalitik aktiviteye sahip olduklarını buldular [9].

Katalizörler küllerin varlığında aktifliğini yitirmektedir. Bu küller motor yağı katkı maddelerinden kaynaklanabilmesinin yanı sıra motor parçalarının aşınması sonucu da meydana gelebilmektedir. Kalsiyum (Ca) kül etkisine neden olan elementlerden biridir [10].

Bu çalışmada Ce-Mn/TiO₂ katalizörün düşük sıcaklık aktivitesi ve yüzey özelliklerine kül etkisine sahip olan Ca elementinin etkisi araştırılmıştır. Katalizör üretiminde ıslak daldırma yöntemi kullanılmıştır. Katalizörün düşük sıcaklık aktivitesi 200 ile 280 °C sıcaklık aralığında araştırılmıştır. NO_x dönüşüm oranlarına motor yükünün etkisinin araştırılması amacıyla performans testleri 1 kW, 2 kW ve 3 kW motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Ca elementinin katalizörün yüzey özelliklerine etkisi BET, SEM ve XRD analizleri yapılarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Katalizör Sentezi ve Karakterizasyonu

Bu çalışmada katalizör sentezi için kordiyerit malzeme kullanılmıştır. Ticari olarak temin edilen kordiyerit yaklaşık olarak 0,5 m²/g yüzey alanına sahiptir. Düşük yüzey alanı katalitik aktif maddelerin yüzeyde dağılımını olumsuz etkilemektedir ve bu durum katalitik aktivitenin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kaplama işleminden önce 200 cm³ hacmine sahip olan kordiyerit malzemeler %50'lik sıcak okzalik asit çözeltisinde 3 saat muamele edilmiştir. Sonrasında kordiyerit malzeme saf su ile yıkanmıştır ve bu işleme yıkama suyunun asitliği giderilene kadar devam edilmiştir.

Katalizör sentezi için öncelikle katalitik aktif maddeleri içeren katalizör tozu hazırlanmıştır. Katalizör tozunun hazırlanmasında kullanılan bileşikler seryum (III) asetat hidrat (Ce(CH₃CO₂)₃•xH₂O), mangan (IV) oksit (MnO₂)

ve titanyum (IV) oksit (TiO_2)'dir. Katalizörün Ce ve Mn içeriği %3 olacak şekilde bu bileşiklerden gereken miktarlarda alınarak 500 ml saf suya eklenip ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bu bileşikler çözündükten sonra çözelti manyetik karıştırıcı yardımıyla ısıtılıp suyu buharlaştırılmış ve macun kıvamına geldikten sonra $120^\circ C$ sıcaklıktaki fırında 2 saat ve $500^\circ C$ sıcaklıktaki kül fırınında 3 saat muamele edilmiştir. Elde edilen karışım öğütülerek katalizör tozu elde edilmiştir.

Elde edilen katalizör tozunun 400 ml saf suya eklenip ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmasının ardından katalizörün Ca içeriği %0,5 olacak miktarda kalsiyum nitrat tetrahidrat ($Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) bileşiği çözeltiye eklenmiş ve karıştırmaya devam edilmiştir. İşlem sonunda hazırlanan solüsyona ön işleminden geçirilen kordiyerit daldırılmış ve $120^\circ C$ sıcaklıktaki fırında 1 saat ve $500^\circ C$ kül fırınında 3 saat muamele edilmiştir. Böylece Ca-Ce-Mn- TiO_2 /Kordiyerit katalizör sentezi gerçekleştirilmiştir.

Katalizör karakterizasyonu için Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarından (ÇÜMERLAB) yararlanılmıştır. Sorptometer 1042 markalı cihaz BET analizi için, FEI Quante 650 FEG markalı taramalı elektron mikroskobu SEM ve EDS analizi için, PANalytical Empyrean marka cihaz XRD analizi için kullanılmıştır.

2.2. SCR Test Sistemi

SCR performans testleri için Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında tasarlanan sistemden yararlanılmıştır. Testler için AKSA A2CRX08 markalı 3000 devir/dakika sabit devirde çalışan iki silindri V tipi dizel motordan elde edilen egzoz gaz numunesi kullanılmıştır. Egzoz gaz numuneleri, bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak ısıtılmıştır. Sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla iki adet K tipi termokupl sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Testler 30000 h^{-1} akış hızında gerçekleştirilmiş olup gaz akış hızı orifis plaka ile ölçülmüştür. Orifis plakasındaki basınç U ve dijital manometre yardımıyla kontrol edilmiştir. SCR performans test sistemi bir dizel oksidasyon katalizörü (DOC) ve bir SCR katalizörü içermektedir. DOC ve SCR arasına yerleştirilen

karışım odasına indirgeyicinin gönderilmesi için bir elektrikli pompa ve çok noktalı elektro-hidrolik enjektör kullanılmıştır. Testlerin farklı yüklerde gerçekleştirilmesi amacıyla her biri 1 kW yüklemeye sağlayan 10 adet rezistanstan oluşan yüklemeye ünitesinden yararlanılmıştır. NO_x dönüşüm oranları SCR katalizörü öncesi ve sonrası iki adet Continental Uni NO_x sensörü kullanılarak ölçülmüştür.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

3.1. Katalizör Karakterizasyonu

Katalizörlerin yüzey alanı katalitik aktiviteyi etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Yüzey alanı ne kadar büyükse aktivite o kadar yüksek olmaktadır. Ca-Ce-Mn- TiO_2 /Kordiyerit katalizörüne ait BET yüzey alanı, Langmiur yüzey alanı, mikro gözenek alanı ve mikro gözenek hacim değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ön muameleden geçirilmemiş olan kordiyerit materyalin yüzey alanı yaklaşık $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ iken ön muamele sonrasında sentezlenen katalizörün BET yüzey alanı ise $30,38 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dir. Sentezlenen katalizörün yüzey alanında $60,76$ kat artış olduğu tespit edilmiştir.

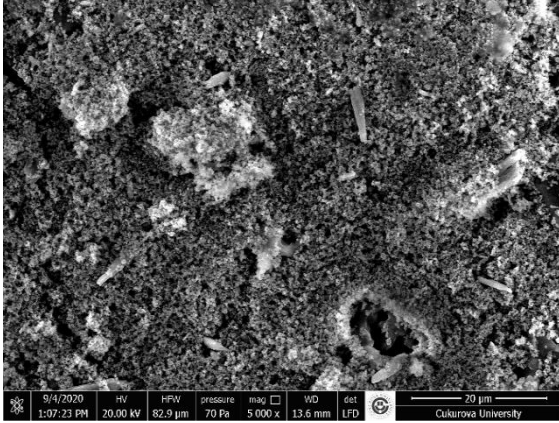
Mikro gözenekler de katalitik aktiviteyi etkilemektedir. BJH (Barrett - Joyner - Halenda) metoduyla belirlenen mikro gözeneklerin alan ve hacim değerlerinin sırayla $6,91 \text{ m}^2/\text{g}$ ve $2,44 \text{ mm}^3/\text{g}$ olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 1. Ca-Ce-Mn- TiO_2 /Kordiyerit katalizörünün yüzey alanı, gözenek alanı ve gözenek hacmi

BET yüzey alanı (m^2/g)	Langmiur yüzey alanı (m^2/g)	Mikro gözenek alanı (m^2/g)	Mikro gözenek hacmi (mm^3/g)
27,93	36,68	6,91	2,44

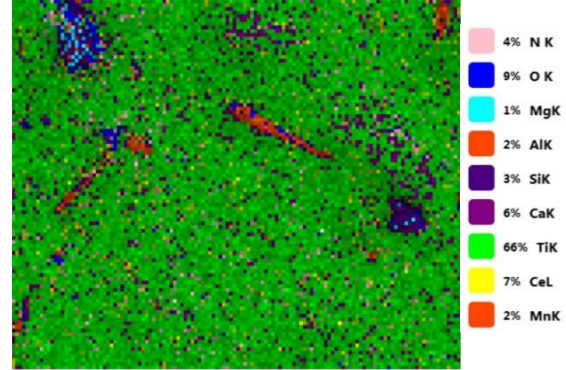
Şekil 1'de $5000x$ büyütmede alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntülerde kordiyerit materyali hemen hemen hiç görünmemektedir. Katalizörün yüzeyinde çok sayıda küçük nanopartikül fark edilmektedir. Bu durum, Ca-Ce-Mn- TiO_2 /Kordiyerit katalizörünün katalitik

elementlerle çok iyi kaplandığını ve elementlerin yüzeyde homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Katalizör elementlerinin katalizör yüzeyinde ve gözenek duvarlarında homojen dağılımı SCR aktivitesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle, katalizörün yüksek NO_x giderme performansına sahip olabileceği düşünülmüştür. Kül etkisi yapan Ca elementinin yüzey morfolojisi üzerinde herhangi bir olumsuz etkisine rastlanmamıştır. Ancak bazı bölgelerde ısıl işlemden kaynaklanmış olabileceği düşünülen kümelenmenin olduğu belirlenmiştir.



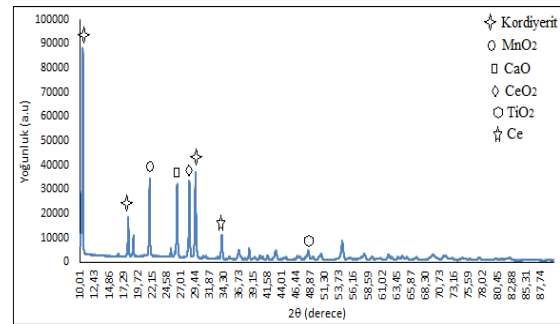
Şekil 1. Katalizörün SEM görüntüsü

Katalitik elementlerin dağılımını incelemek için katalizörlerin EDS haritalaması yapılmıştır ve EDS görüntüleri Şekil 2’de sunulmuştur. Katalizörün farklı noktalarından alınan EDS haritalamasında kordiyeritin yapısını oluşturan oksijen, magnezyum, alüminyum, silikon elementlerinin var olduğu görülmüştür. Ayrıca katalizör yüzeyinde Ti, Ce ve Mn elementlerinin de bulunduğu belirlenmiştir. Katalitik aktif maddeler olarak kullanılan Ce ve Mn elementlerinin kaplama işleminde kullanılan düşük içeriklerinden dolayı oranlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. TiO₂ katalitik elementler için bağlanma alanı sağlayarak katalitik aktiviteyi etkilemektedir. EDS görüntülerinde TiO₂ kaplama malzemesinin yüzeyde çok iyi dağıldığı ve en yüksek orana sahip olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, katalitik aktif malzemelerin kordiyerit yüzeyinde ve gözeneklerinde homojen olarak dağıldığını kanıtlamıştır.



Şekil 2. Katalizörün EDS görüntüsü

Katalizör yüzeyindeki elementlerin kristalizasyonunu belirlemek amacıyla yapılan XRD analizine ait grafik Şekil 3’te verilmiştir. Desende 2θ=10,4°, 18,1° ve 29,4°’de kordiyerite ait yoğun kırınım piklerine rastlanmıştır. Bu piklerin yoğunluğunun diğer piklerden fazla olması ana yapı olarak kullanılan kordiyeritin oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. XRD analizinde kordiyeritin yanı sıra MnO₂, CaO, CeO₂, Ce ve TiO₂ pikleri bulunmaktadır. Kaplama elementlerinden olan MnO₂, CaO, CeO₂ piklerinin birbirine yakın yoğunlukta olduğu görülmektedir. 2θ=46,7°’de görülen ve TiO₂ bileşiğine ait olan pik yoğunluğu çok düşüktür. Buna rağmen katalitik elementleri içeren MnO₂ ve CeO₂ bileşiklerine ait piklerin yoğunluğu yüksektir. Bu nedenle katalizörün iyi aktivite göstereceği düşünülmektedir.

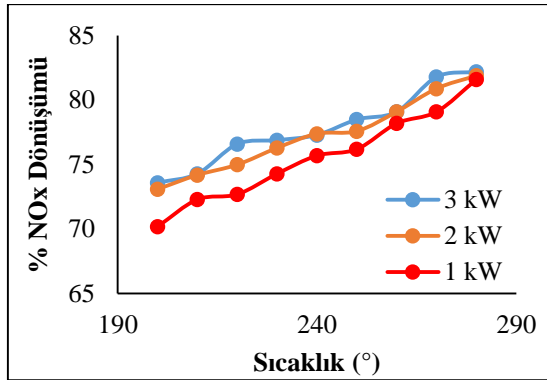


Şekil 3. Katalizörün XRD grafiği

3.2. NO_x Dönüşüm Oranları

Ca-Ce-Mn-TiO₂/Kordiyerit katalizörüne ait sıcaklık ve motor yükü artışına bağlı olarak elde

edilen % NO_x dönüşüm oranları Şekil 4’de verilmiştir. Testler 30000 h⁻¹ akış hızında gerçekleştirilmiştir ve indirgeyici olarak etanol kullanılmıştır.



Şekil 4. Katalizörün NO_x dönüşümüne motor yükünün etkisi

Sıcaklık artışının katalizör aktivitesi üzerine etkisi 200 ile 280 °C sıcaklık aralığında çalışılarak araştırılmıştır. Sıcaklık artışıyla bütün yüklerde katalizörün aktivitesinin arttığı tespit edilmiştir. 300 °C sıcaklıkta maksimum NO_x dönüşümü elde edilmiş olup bu değer %82,2’dir. Çalışma sıcaklığında en düşük NO_x dönüşümü %70,2 olarak 200 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.

NO_x dönüşüm oranlarının Ca etkisiyle azalmış olabileceği düşünülmeye rağmen katalizör veriminin yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun Ce, Mn ve TiO₂ katalitik elementlerinden kaynaklanmış olabileceği sonucuna varılmıştır. Zeng ve arkadaşları MnTi katalizörü ile yaptıkları testlerde NO_x dönüşüm oranlarının %80’in altında olduğunu tespit etmişlerdir [11]. Liu ve arkadaşları Mn/TiO₂ katalizörünün 240 ile 400 °C sıcaklık aralığında NO_x dönüşüm oranının yaklaşık %80 olduğunu rapor etmişlerdir [12]. Kwon ve arkadaşları. 300 °C sıcaklıkta Ce-V/T ve Ce-V/TW katalizörlerinin NO_x dönüşüm oranlarının %80’e yakın olduğunu bulmuşlardır [13].

Farklı motor yükünde egzoz gaz kompozisyonu değişmektedir. Bu değişimin katalitik aktiviteye etkisinin araştırılması amacıyla performans testleri 1 kW, 2 kW ve 3 kW motor yükü altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’de motor yükü artışının

katalitik aktiviteyi olumlu etkilediği görülmektedir. Hem yüksek sıcaklıklarda hem de düşük sıcaklıklarda 3 kW motor yükünde NO_x dönüşüm oranları en yüksek değerde iken 1 kW motor yükünde en düşük değerdedir. Motor yükü artışına bağlı olarak egzoz gazındaki O₂, konsantrasyonu azalmakta, NO_x emisyonu ise artmaktadır. O₂ konsantrasyonu azalması test sisteminde bulunan DOC veriminin azalmasına ve dolayısıyla SCR’nin veriminin azalmasına, dolayısıyla NO_x dönüşüm oranının düşmesine neden olabileceği düşünülmüştür. HC:NO_x oranı verim açısından son derece önemlidir. Motor yükü artışı NO_x emisyonlarının artışına böylece HC:NO_x oranının azalmasına neden olmaktadır. Bu orandaki azalma nedeniyle NO_x dönüşümünün azalmış olabileceği sonucuna varılmıştır. Benzer sonuçlar Keskin ile Keskin ve arkadaşları tarafından da bulunmuştur [14,15].

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Ca-Ce-Mn-TiO₂/Kordiyerit katalizörünün BET yüzey alanı 30,38 m²/g, mikro gözenek alanı 6,91 m²/g ve mikro gözenek hacim değeri 2,44 mm³/g’dır. Okzalik asitle ön muamele sonrasında sentezlenen katalizörün yüzey alanı kordiyerite göre 60,76 kat artış gösterdi.
- Sıcaklık arttıkça katalizörün aktivitesi yükseldi ve 300 °C sıcaklıkta maksimum NO_x dönüşümü elde edildi. Elde edilen en yüksek NO_x dönüşüm oranı %82,2’dir.
- Ca katalitik aktivite üzerinde çok büyük olumsuzluklara neden olmamıştır.
- NO_x dönüşüm oranları motor yükündeki artışa bağlı olarak arttı ve tüm sıcaklıklarda 3 kW motor yükünde maksimum değere ulaşılmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (Proje ID: 13442).

6. KAYNAKLAR

1. Keskin, Z., 2020. Ag-Pt-W/TiO₂ Katalizörünün SCR Aktivitesinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(3), 805-812.
2. Gu, H., Chun, K.M., Song, S., 2015. The Effects of Hydrogen on the Efficiency of NO_x Reduction Via Hydrocarbon-selective Catalytic Reduction (HC-SCR) at Low Temperature Using Various Reductants. International Journal of Hydrogen Energy, 40(30), 9602-9610.
3. Sun, P., Huang, S., Guo, R., Li, M., Liu, S., Pan, W., Fu, Z., Liu, S., Sun, X., Liu, J., 2018. The Enhanced SCR Performance and SO₂ Resistance of Mn/TiO₂ Catalyst by the Modification with Nb: A Mechanistic Study. Applied Surface Science, 447, 479-488.
4. Yeom, Y.H., Li, M., Sachtler, W.M.H., Weitz, E., 2006. A Study of the Mechanism for NO_x Reduction with Ethanol on γ -alumina Supported Silver. Journal of Catalysis, 238, 100-110.
5. Wang, X., Liu, Y., Ying, Q., Yao, W., Wu, Z., 2018. The Superior Performance of Nb-modified Cu-Ce-Ti Mixed Oxides for the Selective Catalytic Reduction of NO with NH₃ at Low Temperature. Applied Catalysis A, General, 562, 19-27.
6. Zhang, K., Wang, J., Guan, P., Li, N., Gong, Z., Zhao, R., Luo, H., Wu, W., 2020. Low-Temperature NH₃-SCR Catalytic Characteristic of Ce-Fe Solid Solutions Based on Rare Earth Concentrate. Materials Research Bulletin, 128, 110871.
7. Yao, W., Gang-gang, L., Shao-qing, Z., Xinyan, Z., Xin, Z., Zheng-ping, H., 2020. Promoting Effect of Ce and Mn Addition on Cu-SSZ-39 Zeolites for NH₃-SCR Reaction: Activity, Hydrothermal Stability, and Mechanism Study. Chemical Engineering Journal, 393, 124782.
8. Yang, J., Ren, S., Zhang, T., Su, Z., Long, H., Kong, M., Yao, L., 2020. Iron Doped Effects on Active Sites Formation Over Activated Carbon Supported Mn-Ce Oxide Catalysts for Low-temperature SCR of NO. Chemical Engineering Journal, 379, 122398.
9. Youn, J.R., Kim, M.J., Lee, S.J., Ryu, I.S., Yoon, H.C., Jeong, S.K., Lee, K., Jeon, S.G., 2021. The Influence of CNTs Addition on Mn-Ce/TiO₂ Catalyst for Low-temperature NH₃-SCR of NO. Catalysis Communications, 152, 106282.
10. Wang, H., Ge, Y., Tan, J., Hao, L., Wu, L., Yang, J., Du, Q., Zhang, H., Huang, Y., Chen, Y., Li, X., Peng, Z., 2019. Ash Deposited in Diesel Particular Filter: A Review, Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 41-18, 2184-2193.
11. Zeng, Y., Wu, Z., Guo, L., Wang, Y., Zhang, S., Zhong, Q., 2020. Insight into the Effect of Carrier on N₂O Formation Over MnO₂/MO_x(M=Al, Si and Ti) Catalysts for Selective Catalytic Reduction (SCR) of NO_x with NH₃. Molecular Catalysis, 488, 110916.
12. Liu, J., Guo, R.T., Li, M.Y., Sun, P., Liu, S.M., Pan, W.G., Liu, S.W., Sun, X., 2018. Enhancement of the SO₂ Resistance of Mn/TiO₂ SCR Catalyst by Eu Modification: A Mechanism Study. Fuel, 223, 385-393.
13. Kwon, D.W., Lee, S., Kim, J., Lee, K.Y., Ha, H.Y., 2021. Influence of Support Composition on Enhancing the Performance of Ce-V on TiO₂ Comprised Tungsten-silica for NH₃-SCR. Catalysis Today, 359, 112-123.
14. Keskin, Z., 2021. Enhancing of Low-Temperature OHC-SCR Activity of Ag/TiO₂ with Addition of MnO₂ Nanoparticles, and Performance Evaluation Using Diesel Engine Exhaust Gases. Environmental Technology & Innovation, 21, 101205.
15. Keskin, Z., Özgür, T., Özarslan, H., Yakaryılmaz, A.C., 2021. Effects of Hydrogen Addition into Liquefied Petroleum Gas Reductant on the Activity of Ag-Ti-Cu/Cordierite Catalyst for Selective Catalytic Reduction System. International Journal of Hydrogen Energy, 46, 7634-7641.

Flow Structures Downstream of Square-shaped Cylinder in Channel

Nazım KURTULMUŞ *¹

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering,
Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 01.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

Experiments were conducted to investigate the flow topology downstream of a square-shaped cylinder situated in a straight channel. The critical parameters such as the Reynolds number ($Re = 500$) and the blockage ratio of the square-shaped cylinder (25%) were determined in light of the literature. A Particle image velocimetry (PIV) system was used to obtain the instantaneous velocity vector map. The flow structures, including the time-mean vorticity distribution, $\langle \omega \rangle$ instantaneous and time-mean streamline topology, Ψ , distributions of streamwise velocity fluctuations, u_{rms} , turbulent kinetic energy, TKE are presented with Figures.

Keywords: Confined cylinder, Flow structures, PIV

Düz Kanal İçerisine Yerleştirilmiş Kare Şekilli Silindir Ardındaki Akış Yapısı

Öz

Bu çalışmada, düz kanal içerisine yerleştirilmiş kare silindir ardındaki akış yapısını araştırma amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki belirleyici parametreler, Reynolds sayısı, Re ve bloklama oranı, β sırasıyla 500 ve %25 olarak literatür doğrultusunda belirlenmiştir. Çalışmada, anlık hız alanını ölçmek için, parçacık görüntülemeli hız ölçüm sistemi (PIV) sistemi kullanılmıştır. Zaman ortalama eşdeğer girdaplar, $\langle \omega \rangle$, ortalama ve anlık akım çizgileri, Ψ , akım yönündeki hız çalkantılarının karelerinin karekökü, u_{rms} , türbülans kinetik enerji, TKE dağılımını içeren akış yapıları şekillerle sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akış yapıları, Sınırlandırılmış silindir, PIV

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Nazım KURTULMUŞ, nkurtulmus@atu.edu.tr

1. INTRODUCTION

The flow structure around bluff bodies exposed to free stream flow has attracted the attention of researchers. Studies considering the flow pattern of the square-shaped cylinder are relatively limited compared to the studies considering the flow pattern of the circular cylinder in the literature [1,2]. Yoon et al. [3] investigated the flow pattern of a square-shaped cylinder with different angles of incidence in laminar flow regime. Jiang and Cheng [4] investigated flow separation around a square-shaped cylinder. Zafar and Alam [5] heat transfer and flow characteristics of cylinders numerically.

Limited studies are examining the flow structure for confined cylinders. Davis et al. [6] performed on the flow pattern of a rectangular-shaped cylinder positioned in a straight channel. They investigated the effect of the inlet velocity profile, the blockage ratio, and the aspect ratio of the rectangular-shaped cylinder on the flow characteristic for the Reynolds number range of 100-1850. The investigated parameters have important consequences on the flow pattern of the rectangular-shaped cylinder. Their results showed that increasing blockage ratio causes the Strouhal number, St to increase. Camarri and Giannetti [7] performed a numerical study to investigate the flow field around a confined square-shaped cylinder. One of the characterizations of confinement, blockage ratio, β varies between 1/10 and 1/6 in their work. According to them, the main characteristics that affect the inversion phenomena are the confinement, the vorticity created by the walls, and the incoming flow velocity profile. Rahnama and Hadi-Moghaddam [8] investigated the heat transfer rate of a square-shaped cylinder in a channel numerically. The working fluid and the blockage ratio, β was determined as air and 1/8, respectively. Their results revealed that the vortex shedding begins at Reynolds number, $Re = 60$ and steady flow characteristics continue up to $Re = 50$. The Nusselt number, Nu increases with increasing Reynolds number, Re . Sharma and Eswaran [9] conducted a numerical analysis to investigate the flow patterns and heat transfer rates of a confined and

unconfined square-shaped cylinder. The blockage ratio varies from %0 (unconfined case) to %50 and the Prandtl number, Pr is chosen as 0.7. Their results showed that the drag coefficient of the square-shaped cylinder raises with a rising blockage ratio, β . The increment of the strength of vortices from the square-shaped cylinder and the upgraded entrainment between the fluid close to the channel wall and the fluid close to the square-shaped cylinder provides enhancement of Nusselt number, Nu of the cylinder with rising blockage ratio, β except for 20%. Reyes et al. [10] used Particle Image Velocimetry (PIV) system to investigate qualitative flow characteristics of a square-shaped cylinder located in parallel plates. They also used numerical methods to compare the results obtained from the experimental method. The blockage ratio is determined as 1/2.5 and the Reynolds number, Re varies from 100 to 256. They observed three different flow regimes: a steady recirculating bubble regime, an unsteady recirculating bubble regime, and a Karman vortex street flow regime. Athinarayanan et al. [11] performed a numerical analysis to examine the heat transfer rate of a square-shaped cylinder positioned in a channel. The blockage ratio, β is determined as 25% and the working fluid is Cu-water nanofluid. The Reynolds number, Re varies from 10 to 40 and the volume fraction of nanofluid varies from 0 to 0.1. According to them, introduced nanoparticles compared with the base fluid play an important role in enhancing heat transfer. Dhiman et al. [12] studied the effect of Peclet number, Pe on flow pattern and heat transfer rates of a square-shaped cylinder positioned in a channel in the steady flow regime. Prandtl number, Pr varies from 0.7 to 4000. The effect of blockage was also investigated. They showed that the average Nusselt number, Nu upgrades with rising the Reynolds number and Prandtl number, Pr . Their further investigation aims to investigate the effects of power-law index and blockage ratio on the flow pattern of a confined square-shaped cylinder [13]. Hegedüs et al. [14] conducted some measurements to investigate the flow parameters on the rectangular-shaped cylinder in the channel. The rectangular-shaped cylinders had four different aspect ratios and the blockage ratio was chosen as 12.5%.

According to them, a slight increase of the Strouhal number, St is observed with an increasing aspect ratio. Shadaram et al. [15] conducted experiments to obtain flow data on a rectangular-shaped cylinder positioned in a straight channel using hot-wire anemometer device. The effect of the height-width ratio of the cylinder on flow data was investigated. With an increasing height-width ratio of the rectangular-shaped cylinder, the turbulence intensity in wake flow decreases. Farhadi and Rahnama [16] performed a numerical analysis to investigate flow parameters of a square-shaped cylinder positioned in a straight channel for Reynolds numbers, Re such as 22×10^3 and 21.4×10^3 . Kim et al. [17] used a large eddy simulation method to examine the flow pattern of square-shaped cylinders in a channel. The blockage ratio, β was implemented as 20% in their work and the Reynolds number is fixed at 3000. A uniform velocity profile is imposed as an inlet boundary condition. According to them, the channel wall has a remarkable effect on the flow parameters of a square-shaped cylinder such as higher turbulent fluctuation compared to an unconfined one. Channel walls reduce the circulating region size in the wake behind the cylinder. Additionally, the drag force values increase. Nakagawa et al. [18] conducted experimental studies on a rectangular-shaped cylinder's heat transfer and flow pattern positioned in a straight channel. The ratio between width and height of the rectangular-shaped cylinder varies such as 0.5,1,2,3. They concluded that the heat transfer enhancement is caused by the vortices shedding from the rectangular-shaped cylinder. Nakagawa et al. [19] used a Laser Doppler Velocimetry system to examine the flow pattern of a rectangular-shaped cylinder positioned in a straight channel. They applied the blockage ratio as 20% and uniform velocity inlet conditions in their experiments. According to them, the turbulent intensities at the middle height of the straight channel get a maximum value close to the stagnation point of a recirculation region. The ratio between width and height of the rectangular-shaped cylinder substantially affects on the coherent flow structures. Ortega-Casanova [20] conducted a numerical analysis to investigate the effect of aspect ratio on flow characteristics of a

rectangular-shaped cylinder in a channel. The blockage ratio was determined as %20 and the aspect ratio (width-height ratio) varies between 1/8 and 4. According to them, the lowest critical Reynolds number is obtained as 30 for the aspect ratio of 1/8. The Strouhal number, St is 0.23 for aspect ratio ≤ 1 and 0.253 for aspect ratio ≥ 2 . Rosales et al. [21] studied heat transfer rates and flow patterns of a square-shaped cylinder positioned in a straight channel numerically. They investigated the wall effect on the vortex shedding from the cylinder and the effect of the upstream eddy promoter on the flow pattern and heat transfer rates on the cylinder. The simulations were performed at $Re=500$. Their results showed that the eddy promoter enhances the heat transfer rate and decreases the drag from the downstream cylinder. The vortex shedding from the cylinder close the wall structure different from the vortex shedding from the cylinder located symmetrically in the channel.

The best of the author's knowledge, there is no work on the flow pattern of a square-shaped cylinder located in a straight channel by using the Particle image velocimetry (PIV) system. The flow patterns, including the time-mean vorticity distribution, $\langle \omega \rangle$ instantaneous and time-mean streamline topology, Ψ , distributions of streamwise velocity fluctuations, u_{rms} , turbulent kinetic energy, TKE are investigated.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Experimental Set-Up

The same experimental set-up introduced by Kurtulmus et al. [22] were used to perform the experiments to examine the flow pattern of the square-shaped cylinder. However, it is necessary to explain the details of the set up briefly.

A pump with a frequency controller pumps the water from a water tank to the water channel. The water flow rate can be changed from $0 \text{ m}^3/\text{h}$ and $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$. An electromagnetic flowmeter measures the volume flow rate which range of $0.17 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 17.6 \text{ m}^3/\text{h}$. The electromagnetic flowmeter was mounted to the water channel before the entrance.

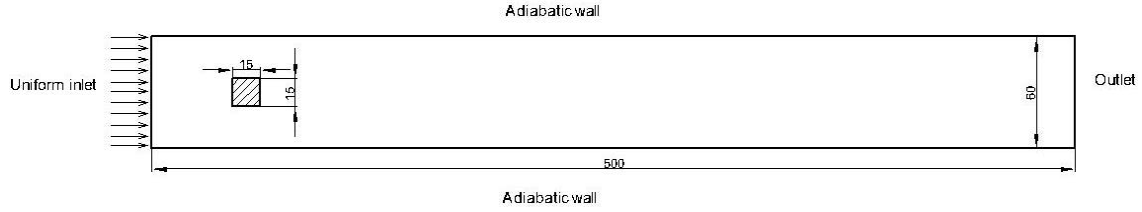


Figure 1. The model tested in the experiments the study

With the directions of the the manufacturer's catalog, pipes with 0.5 m and 1.5 m lengths were mounted to inlet and outlet sections of the electromagnetic flowmeter. The pipes have 25 mm inner diameter. The water enters the closed water channel after the volume flow rate is measured. The closed water channel components are flow straightener section, the diffuser section, the contraction section and the test section. 1 cm thick plate from Plexiglas material is used to produce the closed water channel. The flow straightener section consisted of honeycomb and screen combinations to reduce turbulence at the inlet of the test section. After the flow exits from the flow straightener section, it enters the test section passing through the contraction section. The water moves forward to the thermal regulation system. This thermal regulation system consists of a water reservoir, a heater and a chiller. The heater is coupled with the water reservoir to regulate the water temperature by means of a variable transformer. Then the water is cooled with the chiller. This system is used to keep the temperature of the water constant, which is 17 °C at the test section inlet. After all, the water returns to the water tank to recycle again.

2.2. Measurement of Flow Characteristics

Instantaneous velocity measurements were performed using Particle image velocimetry (PIV) system to investigate flow topology downstream of square-shaped cylinder. A laser light sheet from Nd:YAG laser units illuminates the test section. The laser sheet which has two mm thick was oriented at the midplane of the test section. Therefore, the sidewall effect on the flow is eliminated. 1.5 ms is the time interval between the laser pulses. The image capturing was accomplished with a CCD camera. Hollow glass

sphere particles seeded. They had a diameter of ~10 μm. One thousand instantaneous images of the flow were obtained and logged to the computer for each flow characteristics experiment using the PIV system. 15 images per second can be obtained from the PIV system.

2.3. Test Section

The channel shown in Figure 1 is used as the test section. The test section includes the channel consisted of the side, upper and lower plates and the square-shaped cylinder placed in the channel. This channel was constructed using 1 cm thick plexiglass plates in order to provide laser transmission and flow visualization. In the light of the literature, the height of the channel is 60 mm and the length of one side of the square, D was chosen to be 15 mm in order to provide the blockage ratio as 25% [11]. The square-shaped cylinder was placed 3.8D from the channel's entrance and in the middle of the channel height. To investigate flow characteristics downstream of the square-shaped cylinder, the model shown in Figure 2 were prepared.



Figure 2. The model tested in the experiments

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The hydrodynamics downstream of the square-shaped cylinder in the test section is presented. The flow structures including the time-mean vorticity distribution, $\langle \omega \rangle$ instantaneous and time-mean streamline topology, Ψ , distributions of streamwise velocity fluctuations, u_{rms} , turbulent kinetic energy, TKE are presented with Figures.

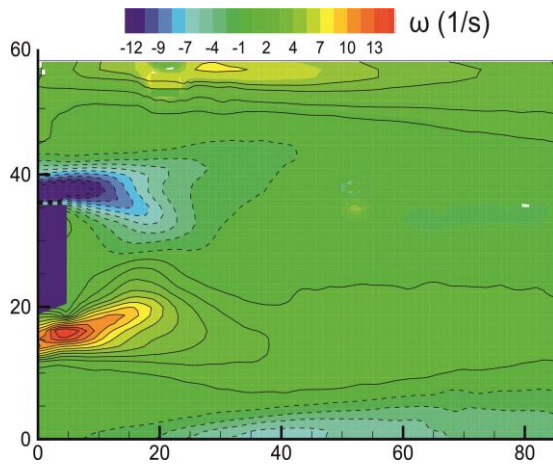


Figure 3. Time-averaged vorticity concentration, $\langle \omega \rangle$ for square-shaped cylinder

The time-mean vorticity contours, $\langle \omega \rangle$ is depicted in Figure 3 for the square-shaped cylinder located in a straight channel. Time-mean vorticity patterns, $\langle \omega \rangle$ quantity can be followed from the legend. In Figure dashed lines shows the negative vorticity patterns, $\langle \omega \rangle$ and solid lines shows the positive vorticity patterns, $\langle \omega \rangle$. The time-mean vorticity clusters, $\langle \omega \rangle$ form at the upstream edge of the square-shaped cylinder and shed through the shear layers. Entrainment between the mean flow and wake regions occurs due to the shear layer instabilities as well as vortex shedding. There are also vorticity clusters near the upper and lower wall just near downstream of the square-shaped cylinder. When one examines the instantaneous vorticity distribution through the flow, the interaction between the vortices shedding due to the existence of square-shaped cylinder and the vorticity clusters generated on the upper and lower wall boundary is clearly seen. This flow phenomenon is expected to increase heat transfer enhancement from the wall because of the disturbance of the boundary layer on the wall.

Figure 4 shows the time-mean streamlines topology, $\langle \Psi \rangle$, for the square-shaped cylinder. The counter-rotating recirculating zones are taken place just behind the square-shaped cylinder due to the flow separation at upstream corners of the square-shaped cylinder.

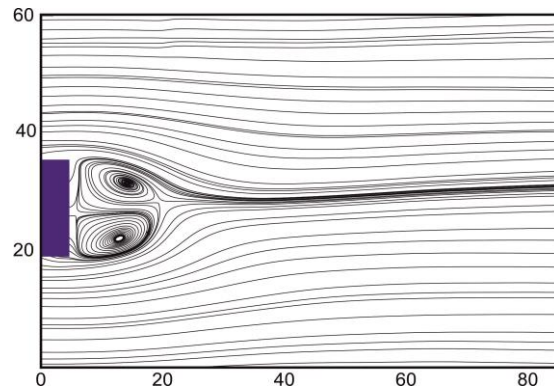


Figure 4. Time-averaged streamlines topology, $\langle \Psi \rangle$, for square-shaped cylinder

The instantaneous streamlines topology, Ψ for square-shaped cylinder placed in a channel over a vortex shedding phenomena is demonstrated in Figure 5. Eight frames with the time interval of $5\Delta t$ in each one were selected to follow the flow pattern. Here, the Δt represents the time interval that each frame is obtained from the PIV system. The flow separates from the wall boundary due to the abrupt geometrical change, and forms the wake region behind the square-shaped cylinder. The wake region instability is clearly seen from the instantaneous streamlines topology. In accordance with vortex shedding phenomenon, recirculation regions at the upper edge and lower edge of the square-shaped cylinder shed alternately.

Figure 6 shows the time-mean rms maps of the u velocity corresponding to $Re=500$ for the square-shaped cylinder located in the straight channel. The fluctuations of streamwise velocity upgrade the heat transfer rate [23]. The distribution of u_{rms} is denser relatively through the shear layer between the main and wake recirculation flow regions.

The instability of vorticity, and the magnitude of the turbulence mixing, is represented as turbulent kinetic energy, TKE . The incremental value of TKE for the square-shaped cylinder shown in Figure 7 is 0.05. It is normalized by dividing averaged stream velocity. As shown in Figure, the high-level TKE contours intensifies behind the square-shaped cylinder where the separated shear layers from the upper and lower sides of the square-shaped cylinder merge.

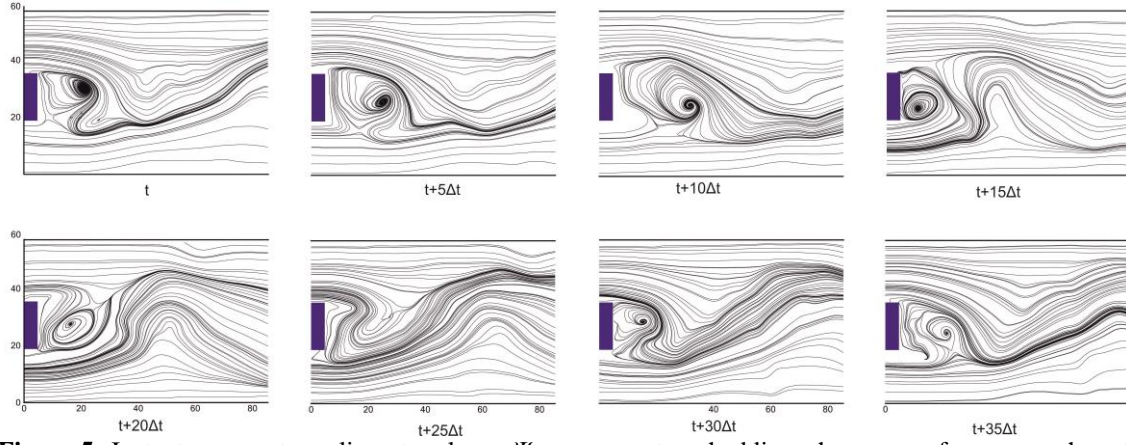


Figure 5. Instantaneous streamlines topology, Ψ over a vortex shedding phenomena for square-shaped cylinder

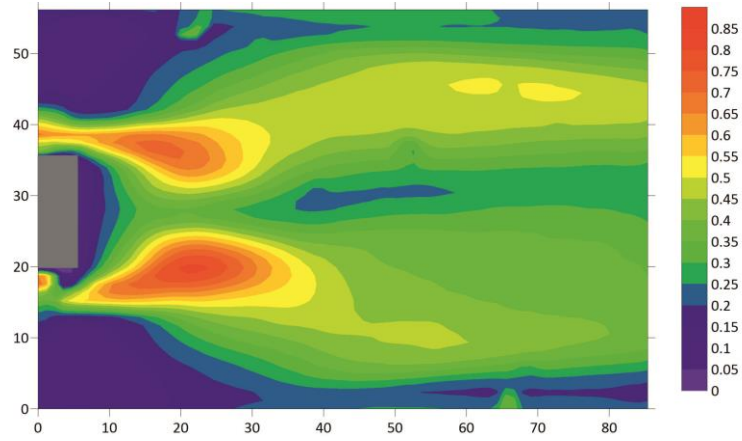


Figure 6. Distributions of streamwise velocity fluctuations for square-shaped cylinder, u_{rms}

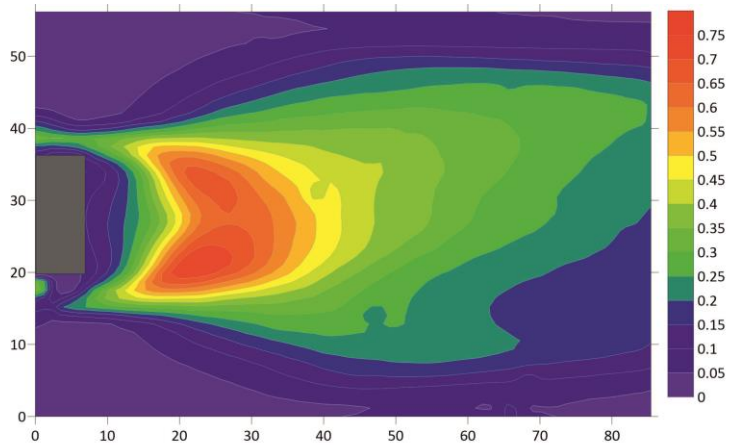


Figure 7. Patterns of turbulent kinetic energy, TKE for square-shaped cylinder

4. CONCLUSION

In this study, experiments were performed to investigate the flow topology downstream of a confined square-shaped cylinder. A particle image velocimetry (PIV) system was used to obtain the instantaneous velocity vector map. The results show that the flow separates at the upstream edge of the square-shaped cylinder and the wake region forms behind the cylinder. Placing a square-shaped cylinder in the channel enhances the interactions between the mean flow and the flow close the channel wall. In addition, the vortices generated from the wall and the vortices shedding from the edge of the squared cylinder encounter downstream of the flow. This flow phenomenon provides enhanced mixing flow in the channel.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges the Mechanical Engineering Department at Cukurova University for the opportunity to perform experiments in the Fluid Mechanics Laboratory.

6. REFERENCES

1. Zdravkovich, M.M., 1997. Flow around Circular Cylinders, Vol. 1: Fundamentals. Oxford University Press, New York.
2. Williamson, C.H.K., 1996. Vortex Dynamics in the Cylinder Wake. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 28, 477–539.
3. Yoon, D.H., Yang, K.S., Choi, C.B., 2010. Flow Past a Square-shaped Cylinder with an Angle of Incidence. *Physics of Fluids*, 22, 043603.
4. Jiang, H., Cheng, L., 2020. Flow Separation Around a Square-shaped Cylinder at Low to Moderate Reynolds Numbers. *Physics of Fluids*, 32, 044103.
5. Zafar, F., Alam, M., 2019. Flow Structure Around and Heat Transfer from Cylinders Modified from Square to Circular. *Physics of Fluids*, 31, 083604.
6. Davis, R.W., Moore, E.F., Purtell, L.P., 1984. A Numerical-experimental Study of Confined Flow Around Rectangular-shaped Cylinders. *Physics of Fluids*, 27, 46- 59.
7. Camarri, S., Giannetti, F., 2007. On the Inversion of the von Karman Street in the Wake of a Confined Square-shaped Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 574, 169-178.
8. Rahnama, M., Hadi-Moghaddam, H., 2005. Numerical Investigation of Convective Heat Transfer in Unsteady Laminar Flow over a Square-shaped Cylinder in a Channel. *Heat Transfer Engineering*, 26, 21-29.
9. Sharma, A., Eswaran, V., 2005. Effect of Channel Confinement on the Two-dimensional Laminar Flow and Heat Transfer across a Square-shaped Cylinder. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 47, 79–107.
10. Reyes, M., Velazquez, A., Martin, E., Arias, J.R., 2013. Experimental Study on the Confined 3D Laminar Flow Past a Square Prism with a High Blockage Ratio. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 44, 444–457.
11. Athinarayanan, A.S.K., Gurunathan, M., Parthasarathy, R.K., Taler, J., Oclon, P., Taler, D., 2019. Numerical Investigation of Heat Transfer from Flow Over Square-shaped Cylinder Placed in a Confined Channel Using Cu-water Nanofluid. *Thermal Science*, 23, 1367-1380.
12. Dhiman, A.K., Chhabra, R.P., Eswaran, V., 2005. Flow and Heat Transfer Across a Confined Square-shaped Cylinder in the Steady Flow Regime: Effect of Peclet Number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4598–4614.
13. Dhiman, A.K., Chhabra, R.P., Eswaran, V., 2008. Steady Flow Across a Confined Square-shaped Cylinder: Effects of Power-law Index and Blockage Ratio. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 148, 141–150
14. Hegedűs, F., Hős, C., Pandula, Z., Kullmann, L., 2010. Measurement on the Cavitating Vortex Shedding Behind Rectangular-shaped Obstacles. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*, 12, 012066.
15. Shadaram, A., Fard, M.A., Rostamy, N., 2008. Experimental Study of Near Wake Flow Behind a Rectangular-shaped Cylinder.

- American Journal of Applied Science, 5, 917-926.
16. Farhadi, M., Rahnama, M., 2005. Three-dimensional Study of Separated Flow Over a Square-shaped Cylinder by Large Eddy Simulation. Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering, 219, 225-234
 17. Kim, D.H., Yang, K.S., Senda, M., 2004. Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Past a Square-shaped Cylinder Confined in a Channel. Computers & Fluids, 33, 81-96.
 18. Nakagawa, S., Senda, M., Kikkawa, S., Wakasugi, H., Hiraide, A., 1998. Heat Transfer in Channel Flow Around a Rectangular-shaped Cylinder. Heat Transfer-Japanese Research, 27, 84-97.
 19. Nakagawa, S., Nitta, K., Senda, M., 1999. An Experimental Study on Unsteady Turbulent Near Wake of a Rectangular-shaped Cylinder in Channel Flow. Experiments in Fluids, 27, 284-294.
 20. Ortega-Casanova, J., 2017. On the Onset of Vortex Shedding from 2D Confined Rectangular-shaped Cylinders Having Different Aspect Ratios: Application to Promote Mixing Fluids. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 120, 81-92.
 21. Rosales, J.L., Ortega, A., Humphrey, L.A.C., 2000. A Numerical Investigation of the Convective Heat Transfer in Unsteady Laminar Flow Past a Single and Tandem Pair of Square-shaped cylinders in a Channel. Numerical Heat Transfer, Part A, 38:443-465.
 22. Kurtulmuş, N., Zontul, H., Sahin, B., 2020. Heat Transfer and Flow Characteristics in a Sinusoidally Curved Converging-diverging Channel. International Journal of Thermal Sciences 148, 106163.
 23. Chen, T.Y., Du, R.K., 2003. Effects of Velocity Fluctuations on Heat Transfer Enhancement. Experiments in Fluids, 34, 548-555.

Energy-Exergy and Cost Analyses of Solar Tower Systems with Various Capacities for Mersin Province

Elif TURNA DİLSEL¹, Bengi GÖZMEN ŞANLI*¹

¹Mersin University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin

Geliş tarihi: 01.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

In present study, technical performance and cost of the solar tower system with the capacities of 10 and 20 MW for Mut district of Mersin were investigated. The solar tower systems with various capacities were redesigned by using SAM (System Advisor Model) program theoretically. For SAM program analysis, TMY3 solar radiation data of Mut district of Mersin located at the coordinates of 33.4° E 36.7° N was used. For the capacities of 10 and 20 MW, the energy generated by this system was determined and the cost of solar tower system was calculated for this system with the capacity of 10 and 20 MW, the number of heliostats was determined as 580 and 1115, respectively and the layout plan of heliostat was generated. Moreover, the first law and the second law of thermodynamic were applied. Energy and exergy efficiencies were determined.

Keywords: Solar power towers, System Advisor Model (SAM), Energy

Mersin Mut İlçesi için Farklı Kapasiteli Güneş Kuleleri Enerji Ekserji Analizi ve Maliyet Analizi

Öz

Bu çalışmada Mersin'in Mut ilçesine ait 10 ve 20 MW kapasiteli güneş kulesi sisteminin teknik performansı ve maliyeti incelenmiştir. Çeşitli kapasitelerdeki güneş kulesi sistemleri teorik olarak SAM (System Advisor Model) programı kullanılarak tasarlanmıştır. SAM program analizi için Mersin ili Mut ilçesine ait 33.4° D 36.7° K koordinatlarında bulunan TMY3 güneş radyasyonu verileri kullanılmıştır. 10 ve 20 MW kapasiteler için bu sistemin ürettiği enerji belirlenmiş ve 10 ve 20 MW kapasiteli bu sistem için güneş kulesi sisteminin maliyeti hesaplanmış, heliostat sayısı sırasıyla 580 ve 1115 olarak belirlenerek yerleşim planı oluşturulmuştur. Ayrıca, termodinamiğin birinci yasası ve ikinci yasası uygulanarak, enerji ve ekserji verimlilikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş kulesi sistemleri, (SAM), Enerji

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Bengi GÖZMEN ŞANLI, bengigozmen@mersin.edu.tr

1. INTRODUCTION

Solar energy is one of the preferable energy sources and new methods are developed to use solar energy day by day. The solar energy is widely used in engineering application from calculator to electrical power production. Solar tower system is one of the electric energy generation systems. At the solar tower systems, thermal energy is converted to electrical energy by concentrating the sun's rays to the receiver mounted on the top of the tower. A solar tower system consists of heliostats and receiver. The energy generated by the sun's rays coming to the receiver is absorbed by the working fluid used in the system. By the steam in the steam power cycle, the electrical energy production is provided [1].

With this study, it is aimed to evaluate solar tower systems as an alternative method in order to effectively use the solar potential of Mersin region located in the first generation of the solar map. Technical performance and cost of the solar tower system with the capacities of 10 and 20 MW for Mut district of Mersin were investigated. The solar tower systems with various capacities were designed by using SAM (System Advisor Model) program theoretically. For SAM program analysis, TMY3 solar radiation data of Mut district of Mersin located at the coordinates of 33.4° E 36.7° N, which is taken from METEONORM, was used. And technical performance data was obtained from SAM program by using data taken from METEONORM and the cost of the solar tower system was calculated. Correspondingly, energy and exergy analyses were performed.

2. PREVIOUS STUDIES

Nowadays, studies on the solar tower systems increase owing to many advantages of these systems. Üçgül et al. [2] performed an investigation on electrical power generation for the university of Süleyman Demirel by designing solar tower systems with capacity of 2MW. The layout plan of heliostat was determined. Furthermore, energy and exergy analyses were done. Another solar tower design, technical and cost analysis

study were done by Selbaş et al. [3]. Grasse [4] studied on the solar tower systems with capacity of 30 MW in order to commodify. For 30 years operating times, cost analysis was performed and price of electricity was calculated. Gottschalk et al. [5] designed solar tower systems with capacity of 100MW for various countries like China, Germany and Mediterranean countries. Hekim [6] designed a solar tower system having the capacity of 10 MW with SAM program for Birecik district of Urfa. Moreover, the technical performance of the system and efficiency of the system were assessed. An other study on the solar tower system was carried by Agan et al. [7]. A solar tower system with the capacity of 10 MW for Ceylanpınar district was designed by using with SAM (System Advisor Model) program. The amount of energy production, number of heliostats, heliostat placement and the cost of the system were obtained. In Adıyaman's study [8], she modeled the receiver of the solar tower system by considering the receivers with external pipes used in solar towers and she compared the results in the literature with the ANSYS Fluent program and verified the model. As a result of the analysis, a new buyer model has been designed to reduce losses. Papagorgiou [9] studied on the efficiency of a solar tower system. In the analysis of the system, the system efficiency is considered to be 80%, the effect of its main dimensions, working coefficients and collector input conditions on the system have been examined. Xu et al. [10] modeled a solar tower system using molten salt as heat transfer fluid. They performed energy-exergy analyses of the system theoretically. The reasons of loss of the solar tower systems were revealed. Yang et al. [11] investigated the interaction of performance of molten salt receiver and efficiency of the system. To increase heat transfer, many experiments were done by using the receivers having straight tube and spiral tube.

3. MATERIAL AND METHOD

In present study, meteorological datas of Mut district of Mersin province have been used due to having high solar energy potential and suitable geographical conditions. The average annual

sunshine duration of this region is about 8.27 hours. Mut has a warm climate with an average annual temperature of 18.1 °C and the average annual rainfall is about 758 mm. The warmest month of the year is July with an average annual

temperature of 30.7 °C and the coldest month of the year is January [12]. The annual global solar radiation or solar radiation map of Mut district and the solar energy potential are shown in Figure 1 [13].

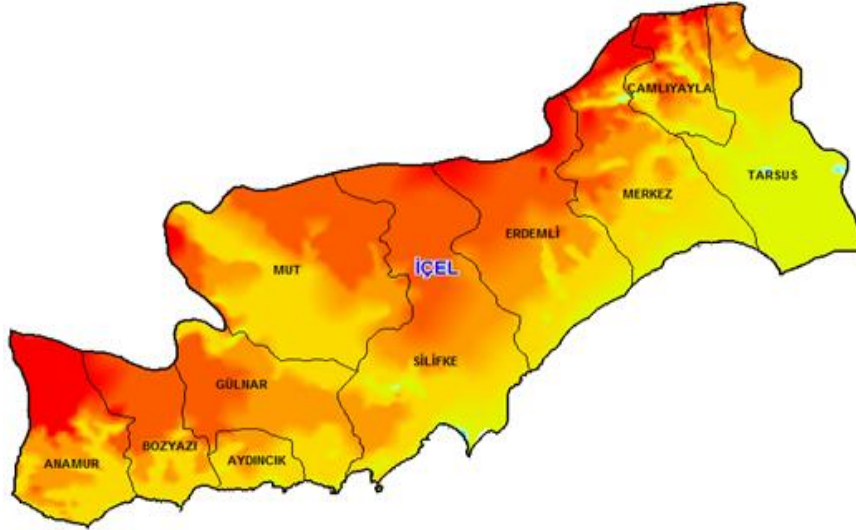


Figure 1. Solar map of Mersin province [13]

3.1. Solar Tower Systems

Nowadays, new methods are developed to provide energy production by utilizing solar energy. The solar tower system is one of these new methods. The solar tower systems have been used in Russia, Italy, Spain, Japan, France and the United States since 1980s. Solar tower systems consist of a tower where the receiver is located on and mirrors positioned around the tower to reflect the sun's rays [14].



Figure 2. The schematic representation of a solar tower system [15]

Solar tower systems have been used widely in various parts of the world due to the advantages. These advantages can be listed as follows [16]:

- Solar tower systems are safe. Since the system has a simple structure, the probability of failure is less compared to other systems and it is operated at lower cost.
- Solar tower systems do not need the cooling water to provide energy production contrary to many energy generation systems.
- Solar tower systems can generate energy at night by collecting sunlight in the receiver without the need for direct sunlight, compared to other solar energy systems.
- The materials required for the installation of solar tower systems are simple and easily available.
- This system is are easily applicable systems in every region owing to the fact that there is no need for high technology for installation.

3.1.1. Elements of Solar Tower Systems Receiver

Receiver is the element located at the top of a high tower and the sun's rays are concentrated on the receiver by using heliostats. Figure 3 demonstrates an example of receiver. It can be said that the receiver is a kind of heat exchanger that converts sun's rays to the heat energy [6-17]. The receivers are exposed to direct or indirect sunlight depending on the structure and type of the materials used during the energy transfer to the working fluid [18]. In order to minimize solar radiation losses, the receivers behave in the form of a black body and centrally combine all the sun rays focused by the heliostats in large heliostat fields.



Figure 3. Receiver [19]

Heliostat

In solar tower systems, tracking mirrors that focus sunlight on the receiver to concentrate it are called heliostats. Heliostats are a kind of two-dimensional mirrors tracking the sun's rays by an open loop control system. They are preferred to reflect and concentrate the sun's rays to the central receiver [18]. The heliostats shown in Figure 4, which are the most basic parts of solar tower systems, consist of the heliostat frame, heliostat arm and heliostat foot and move in two ways, spherical and local during sun tracking [20-21].



Figure 4. Heliostat [22]

3.2. Operation Principle of Solar Tower Systems

In the solar tower systems, thermal energy is converted into electrical energy by concentrating the sun's rays to the receiver mounted on the top of the tower. In these systems, there are many solar tracking mirrors called heliostats in order to reflect the rays coming from the sun by concentrating and focus them on the receiver [23]. The working fluid used in the system absorbs the energy generated by the sun's rays coming to the receiver. The energy generated by the sun's rays coming to the receiver is absorbed by the working fluid used in the system. The molten salt is used as the working fluid in the Rankine cycle. The molten salt embodies the heat long time [14-24]. In the solar tower system, the liquid molten salt at the temperature of $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ is pumped from cold tank to the receiver and the molten salt is heated to the temperature of $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ and it is sent to the hot tank. Then, the heated molten salt is pumped to the steam generation system at the Rankine cycle. After the molten salt in the steam generator returns the cold tank, the storage of it is provided [25]. Operation Principle of Solar tower systems is given in Figure 5 [26].

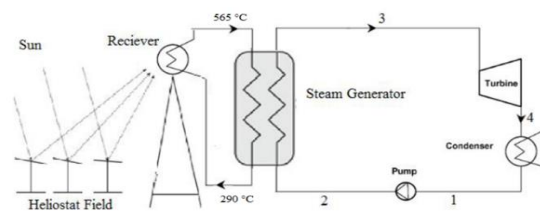


Figure 5. Operation principle of solar tower systems

3.3. Thermodynamic Analysis of Solar Tower Systems

The solar tower systems convert solar power into electrical energy by using Rankine cycle. The Figure 6 indicates the schematic diagram of Rankine cycle and chart of T-S. The elements of cycle are pump, evaporator, turbine and condenser. The cycle starts with pumping of the working fluid to the evaporator and then the heat transfer occurs

at the constant pressure. By means of heat transfer, the working fluid becomes superheated vapor and this superheated vapor is sent to the turbine and the pressure is decreased. The mechanic power which is obtained rotating shaft is converted into the electrical energy by connecting generator to the shaft. At the condenser, the heat is transferred to the energy well at the low temperature and low pressure. The cycle is completed by sending the compressed fluid to the pump [27].

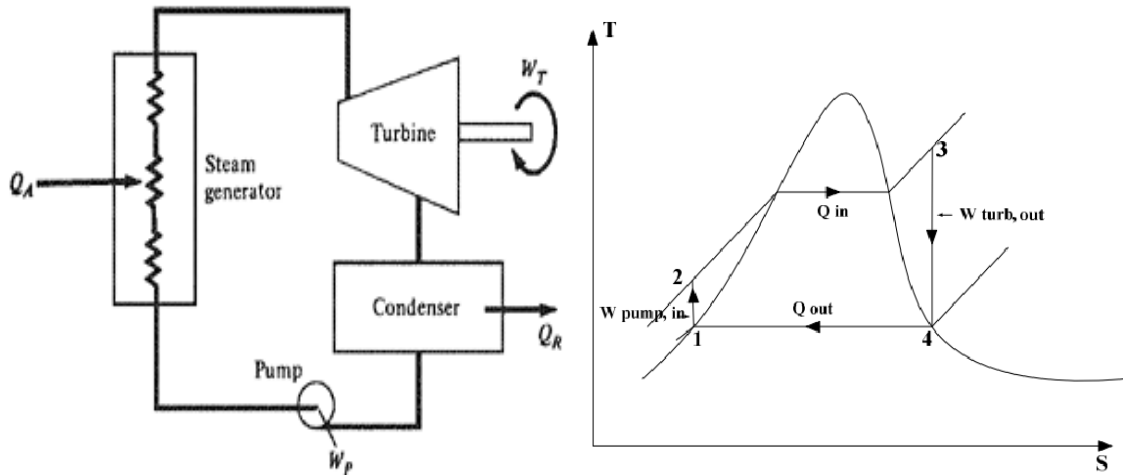


Figure 6. The schematic diagram of Rankine cycle and chart of T-S

The internal energy is constant since the Rankine cycle is a closed-loop system. By using the energy conservation equation, the equation 1 is obtained and this equation means that net work equals to net heat transfer and the net work can be calculated by using the equation 2 [27].

$$W_{n,out} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

$$W_{n,out} = W_{out} - W_{in} \quad (2)$$

Thermal efficiency is defined as the conversion ratio of net work into heat input as shown below [27].

$$\eta_T = \frac{W_{n,out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (3)$$

The heat transferred to the working fluid at the evaporator can be indicated as [27].

$$Q_{in} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (4)$$

The shaft power generated by turbine can be defined at the equation 5. The isentropic efficiency of turbine is expressed with the equation 6 [27].

$$W_{out} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (5)$$

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (6)$$

The discharged heat to the environment is defined with the equation 7. The spent work at the pump and pump efficiency are calculated by using the Equations 8 and 9, respectively [27].

$$Q_{out} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (7)$$

$$W_m = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (8)$$

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

For calculation of total efficiency of the system, electrical energy actuating the pump, efficiency of electrical motors of water pump, fan and generator efficiency are important parameters and total efficiency is defined as the ratio of the generated electrical energy to the heat input into the working fluid [28].

At the solar tower systems, exergy balance is presented with the equation 10 and exergy calculations are performed by reading the thermodynamic properties for the each point of the cycle and using the equations below [28].

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{loss} \quad (10)$$

Total exergy at the unit of time is shown with “E” and it is computed by using the Equation 11 [29].

$$\dot{E} = \dot{m}\psi \quad (11)$$

The flow exergy is explained with the equation of 12. At this equation, T_0 means dead state temperature [29].

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (12)$$

The equation 13 represents the calculation of the reversible work of system [29].

$$\dot{W}_{reversible} = \dot{m}(\psi_2 - \psi_1) \quad (13)$$

The reversible work of turbine is defined as shown with the equation 14 while the turbine efficiency is computed by using the equation 15 [29].

$$\dot{W}_{t,rev} = \dot{W}_t + \dot{W}_{t,loss} \quad (14)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{t,rev}} \quad (15)$$

For the pump, the equations 16 and 17 are used to calculate the reversible work and pump efficiency, respectively [29].

$$\dot{W}_{p,rev} = \dot{W}_p - \dot{W}_{p,loss} \quad (16)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\dot{W}_{p,rev}}{\dot{W}_p} \quad (17)$$

The loss exergy and exergy efficiency can be calculated by using the equations 18 and 19, respectively [29].

$$\sum \dot{E}_{loss} = \sum \dot{E}_{t,loss} + \sum \dot{E}_{p,loss} + \sum \dot{E}_{b,loss} + \sum \dot{E}_{y,loss} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{system} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{heat\ source}} \quad (19)$$

3.4. System Advisor Model (SAM)

The System Advisor Model (SAM), which is used to perform both technical and cost analyses of projects on generation of power from renewable energy sources, is a free techno-economic software model. This software program, which was first released under the name of “Solar Advisor Model”, was continued to be used in 2010 by taking the name “System Advisor Model” after its content was developed. SAM calculates the hourly system performance and energy cost by using the design parameters in the models to be made in the projects created to obtain power from renewable energy sources. To analyze system performance and the cost of the system, design parameters and meteorological datas known as Typical Meteorological Year (TMY3) with CSV extensions, which belong METEONORM firm, are used. The modules of SAM program used in this study are demonstrated in Table 1 [30].

Table 1. The modules of SAM program [30]

Modules of program	Description
Location and resource	This is the module that meteorological data and geographical data are inputted to SAM program
Heliostat field	This is the module that the required area for heliostat and the number of heliostat are determined
Tower receiver	This is the module that height and diameter of receiver and chemical properties of molten salt are determined.
Power cycle	This is the module that the capacity of system and power generated by system are determined.
Thermal storage	This is the module that the number of storage tank and storage time are determined
Tower system costs	This is the module that cost of system elements and cost of overall system are calculated

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this investigation, technical performance analyses and cost analyses of the solar tower system with the various capacities as 10 MW and 20 MW for Mut district of Mersin were performed. The solar tower systems with the capacities of 10 MW and 20 MW were designed by using SAM (System advisor Model) program and the layout

plan of heliostats was obtained. The design parameters used in the analyses of SAM program are presented in Table 2. The technical data of system acquired from SAM program were used to implement the thermodynamic analyses. And the results of solar tower systems with the capacities of 10 MW and 20 MW were compared.

Table 2. Design parameters of solar tower system [31]

Parameters	Amount
Width of heliostat	12.3 m
Width of heliostat	9.75 m
Receiver height	6 m
Diameter of receiver	8 m
The number of storage tank	2
Storage of storage tank	10 hours
Input temperature of molten salt	290 °C
Output temperature of molten salt	565 °C
Min temperature for operating the system	500 °C
Pressure of steam	10 MPa
Pressure of condenser	200kPa
Temperature of reference (dead state)	25 °C
Pressure of reference (dead state)	100kPa
Turbine efficiency	0.87
Pump efficiency	0.82
Optical efficiency	0.92
Receiver efficiency	0.83
Wind velocity	5 m/s

In order to obtain the main results, meteorological data named Typical Meteorological Year (TMY3) in csv format, which belong to METEONORM firm, are used. Figure 7 demonstrates the location information and weather data information of Mut district of Mersin.

The screenshot shows the SAM software interface with the following data:

Location Information					
City	Mut	Timezone	GMT 2	Latitude	36.64 deg
State		Elevation	322 m	Longitude	33.44 deg
Weather Data Information (Annual)					
Direct Normal	2226.0 kWh/m ²	Dry-bulb Temp	20.2 °C	View hourly data...	
Global Horizontal	1903.7 kWh/m ²	Wind Speed	1.9 m/s		

Figure 7. Location information and weather data information for Mut [28]

After determining of design parameters shown in Table 2, the system analyses were done by SAM program and the tower heights of solar tower systems with the capacities of 10 MW and 20 MW were calculated as 51.11 m ve 71.11 m, respectively. Furthermore, the numbers of required

heliostat with the height of 9.75 m and the width of 12.3 m were determined as 580 and 1115 for the solar tower systems with the capacities of 10 MW and 20 MW, respectively. The layout plans of heliostat composed by dividing the region azimuthal and radially are depicted in Figure 8.

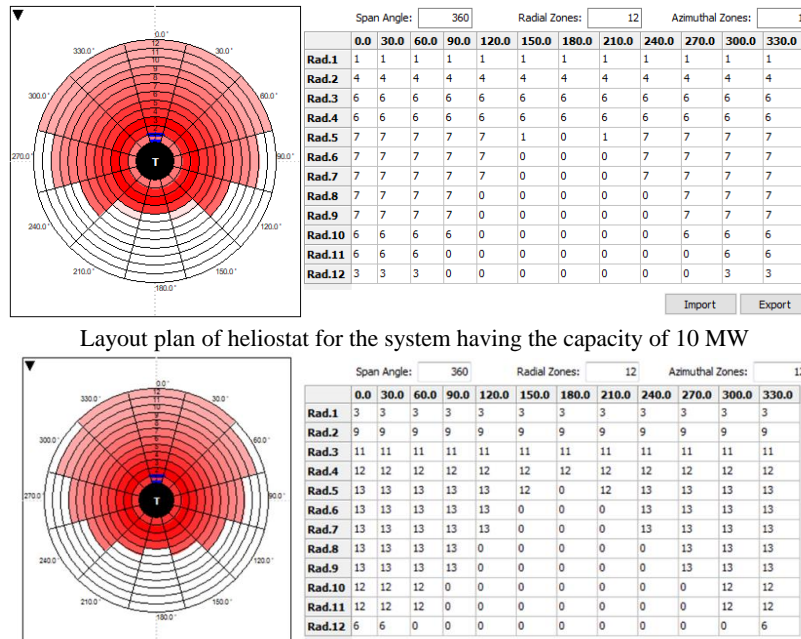


Figure 8. Layout plans of heliostat

The net power generated by the solar tower systems with the capacities of 10MW and 20 MW were theoretically determined as 9 MW and 17 MW owing to the loss in the system, respectively. According to the layout plans of heliostat, the required area for this system with the capacity of 20 MW was calculated as 149 decares and annual thermal energy was determined as 48.532 MWh while the required area for this system with the capacity of 10 MW and the annual thermal energy were assessed 84 decares and 24.272 MWh by SAM program, respectively. Moreover, two hot tanks with 10 hours refill time and two cold tank with 10 hours refill time were used both the solar tower systems with the capacities of 10MW and 20 MW. The storage capacities of hot and cold tanks for the system designed for 10MW were obtained as 349.42 m³ and 815.32 m³ whereas the

capacities of hot and cold tanks for the system designed for 20MW were calculated as 677.52 m³ and 1580.89 m³, respectively. The cost analyses of the system were performed by using SAM program and Table 3 indicates the details of cost analyses.

Table 3. The details of cost analyses for the solar tower system

Expenditure	Total cost for the system with the capacity of 10 MW (\$)	Total cost for the system with the capacity of 20 MW (\$)
Heliostat	\$12.144.564,90	\$23346879.08
storage	\$6.553.398,06	\$13106796.12
Tower	\$5.521.462,60	\$6817939.42
Receiver	\$16.057.548,64	\$22968114.05
Others	\$20.487.278,56	\$57297500.05
Toplam	\$60.764.252,76	\$123537228.72

After the performance analysis and cost analysis were completed by SAM program, energy and exergy analyses were performed by using the equations mentioned above. According to the first law of thermodynamic, the pump work (W_{in}) was assessed about 12.68 kJ/kg, turbine work (W_{out}) was calculated as 134543.21 kJ/kg and the efficiency of the system was determined 44.32%.

By using the second law of thermodynamic, the loss exergy was calculated as 33125,704 kJ/s. For the same dead state temperature and pressure, the exergy efficiency was determined as 42.75% based on the flow rate of the fluid used in the two systems with the capacity of 10 and 20 MW. Furthermore, both the exergy efficiencies of pump and turbine were determined as %80.83 ve %75.38, respectively.

5. CONCLUSION

In this study, the solar tower systems with the capacities of 10 and 20 MW for Mut district of Mersin located at the coordinates of 33.4° E 36.7° were designed by using SAM theoretically. The net power generated by the solar tower systems with the capacities of 10MW and 20 MW were theoretically determined as 9 MW and 17 MW owing to the loss in the system, respectively. Moreover, The numbers of required heliostat with the height of 9.75 m and the width of 12.3 m were determined as 580 and 1115 for the solar tower systems with the capacities of 10 MW and 20 MW, respectively. By using the solar tower systems with the capacity of 10 MW and tower height of 51.11 m, the obtained thermal energy was determined as 24.272 MWh and the cost of this system was calculated as \$60764252,76. On the other hand, for the solar tower systems with the capacity of 20 MW and tower height of ve 71.11 m, the obtained thermal energy and cost of this mentioned system were assessed as 48.532 MWh and \$123537228.84, respectively.

According to the first and second law analyses, the energy efficiency in both systems is 44.32%; while the exergy efficiency was calculated 42.75%.

6. REFERENCES

1. Şenol, R., Üçgül, İ., Koyun, A., Acar, M., 2011. 10 MW'lık SDU Güneş Güç Kulesi Tesis Tasarımı. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(4), 813-821.
2. Üçgül, İ., Selbaş, R., Kızılkıran, Ö., Şenol, R., Karakoç, H., 2003. Elektrik Enerjisi Üretiminde Güneş Kulesi Sisteminin Yapay Sınır Ağlarıyla Modellenmesi. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 264-275.
3. Selbaş, R., Yakut, A.K., Şencan A., 2003. Güneş Kulesi Modeli ile Elektrik Enerjisi Üretimi için Bir Uygulama. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 179-184.
4. Grasse, W., 1991. PHOEBUS: International 30 Mwe Solar Tower Plant. Solar Energy Materials, 24(1-4), 82-94.
5. Gottschalka, A., Ramamoorthia, U., 2018. Parametric Simulation and Economic Estimation of Thermal Energy-storage in Solar Power Tower. Materials Today: Proceedings 5, 1571–1577.
6. Hekim, M., 2017. Merkezi Alıcı Sistemli (MAS) Güneş Güç Santrali Birecik Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 160.
7. Ağan, C., 2016. Güneş Güç Santrali ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi için Bir Uygulama, Bitirme Çalışması. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
8. Adıyaman, G., 2018. Güneş Kulesi Alıcı Veriminin Sayısal Analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 140.
9. Papageorgiou, C.D., 2003. Efficiency of Solar Air Turbine Power Stations with Floating Solar Chimneys. <http://www.floathingsolarchimney.gr>, Erişim Tarihi: a27.04.2019.
10. Xu, C., Wang, Z., Li, X., Sun, F., 2011. Energy and Exergy Analysis of Solar Power Tower Plants. Applied Thermal Engineering, 3904-3913.
11. Yang, M., Yang, X., Yang, X., Ding, J., 2010. Heat Transfer Enhancement and Performance of the Molten Salt Receiver of a Solar Power Tower. Applied Energy, 87 (9), 2808-2811.
12. Anonim. <https://tr.climate->

- data.org/asya/tuerkiye/mersin/mut1865a6/, Erişim Tarihi: 20 Şubat 2021.
13. Anonim, <http://www.enerjiatlası.com/gunes-enerjisiharitasi/mersin>, Erişim Tarihi: 24 Mart 2019.
 14. Karaman, R., 2016. Kombine Organik Rankine ve Kompresörlü Soğutma Çevriminin Termodinamik Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 98.
 15. Schlaich, J., 2002. The Solar chimney, <http://www.sbp.de>, Erişim Tarihi: 21 Şubat 2019.
 16. www.watermill.com, Erişim Tarihi: 22 Şubat 2019.
 17. Pişirir, O.M., 2014. Güneş Güç Kuleleri için Endüstriyel Pc Tabanlı Heliostat Kontrolü. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 99.
 18. <https://www.power-technology.com/projects/aurora-solar-energy-project/>, Erişim Tarihi: 24 Şubat 2019.
 19. Özcan, A.K., 2005. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi ile Metal Ergitme. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 112.
 20. Cauble, A., 2013. Brightsource's Heliostat Technology. 24 Mart 2019 tarihinde <http://www.brightsourceenergy.com/brightsource%E2%80%99s-heliostattechnology#.XOqgi4gzBIU>, Erişim Tarihi: 26 Şubat 2019.
 21. <https://www.sustainabilitymatters.net.au/content/energy/news/csiro-s-heliostat-systems-to-be-deployed-in-china-712665658>, Erişim Tarihi: 24 Şubat 2019.
 22. Metin, İ., 2006. Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanılan Güneş Kulesi İçindeki Doğal Konveksiyonun Sayısal Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 10-14.
 23. Çevik, M., 2018. Akdeniz Bölgesinde Kurulacak Olan Güneş Kulesinin Enerji ve Ekserji Analizi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun, 83.
 24. Şenol, R., 2009. Güneş Kulelerinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Araştırılması ve Optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta, 223.
 25. Tiryaki, G., 2017. Energy and Exergy Analysis and Performance Optimization of a Solar Power Tower System. Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 118.
 26. Çengel, Y.A., Boles M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. (A. Pınarbaşı, Çev.) Literatür Yayıncılık, 978.
 27. Gürlek, N.A., 2016. Organik Rankine Sistemi ve Türbininin Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91.
 28. Yağlı, H., Koç, A., Koç, Y., Mumcu, A.G., 2014. Güneş Kulesinin Deniz Üzerinde Tasarımı ve Ekserji Analizi. ISITES'14, 906-915.
 29. NREL, 2013, System Advisor Model (SAM) Version 2013.1.15 Manual.
 30. Şanlı, B., Dilsel, T.E., Çalık, A., 2019. Design and Cost Analysis of Solar Tower with the Capacity of 20 mw in Mut District of Mersin Province by Using Sam Program, 2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology.

Lift Coefficient Estimation of a Delta Wing Under the Ground Effect Using Artificial Neural Network

Sergen TÜMSE¹, Mehmet BİLGİLİ², Beşir ŞAHİN*¹

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

²Çukurova University, Faculty of Ceyhan Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 17.05.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

The estimation of the lift coefficient, C_L of a non-slender delta wing under the ground effect, is performed by employing an artificial neural network (ANN). The purpose of the study is to estimate the lift coefficient, C_L acting on the delta wing for the ground distance $h/c=0.4$ by utilizing the actual lift coefficient, C_L for the ground distances $h/c=1, 0.7, 0.55, 0.25$ and 0.1 . In this ANN model, the angle of attack, α and ground distance, h/c were used as input parameters and lift coefficients, C_L as the output parameter. While mean absolute percentage error (MAPE) and root mean squared error (RMSE) were found as 1.60% and 0.0114 in the testing stage, they were calculated as 1.77% and 0.01 in the training stage. Hence, this investigation shows that the lift coefficient, C_L of the delta wing in ground effect can be correctly estimated by developing an ANN model.

Keywords: Artificial neural network, Delta wing, Ground effect, Lift coefficient

Yer Etkisi Altındaki Delta Kanat Üzerinde Oluşan Taşıma Katsayısının Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Tahmin Edilmesi

Öz

Bu çalışmada, yapay sinir ağı kullanılarak, yer etkisi altında olan düşük süpürme açısına sahip delta kanat üzerindeki taşıma katsayısının, C_L tahmini yapılmıştır. Çalışmanın amacı boyutsuzlaştırılmış yer mesafesinin, $h/c=1, 0,7, 0,55, 0,25$ ve $0,1$ olduğu durumlardaki gerçek taşıma katsayıları kullanılarak, boyutsuz yer mesafesinin, $h/c=0,4$ olduğu durumdaki taşıma katsayısını tahmin etmektir. Oluşturulan yapay sinir ağı modelinde, hücum açısı, α ve boyutsuzlaştırılmış yer mesafesi, h/c girdi parametreleri olarak kullanılmış, taşıma katsayısı, C_L ise çıktı parametresi olarak kullanılmıştır. Oluşturulan yapay sinir ağı modelinin eğitimi aşamasında, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) sırasıyla % 1,60 ve 0,0114 olarak hesaplanırken, test aşamasında bu değerler sırasıyla % 1,77 ve 0,01 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, yapay sinir ağı kullanılarak yer etkisi altında olan delta kanat üzerindeki taşıma katsayısının, C_L doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağı, Delta kanat, Yer etkisi, Taşıma katsayısı

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Beşir ŞAHİN, bsahin@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Non-slender delta wings are usually employed in Unmanned Air Vehicles, Micro Air Vehicles, and fighter crafts due to high maneuver capacity even at high angles of attacks. Two counter-rotating leading-edge vortices can identify the flow structure around delta wings that occurs symmetrically with respect to the delta wing's axis. There are a lot of studies and excellent reviews about vortical flow structure and aerodynamic characteristics of delta wing such as Gursul et al. [1], Ol and Gharib [2] and Gursul et al. [3].

The lift coefficient, C_L , is a dimensionless number that engineers and researchers utilize to model whole complex dependencies of shape, inclination and some flow conditions [4]. It denotes the ratio of the lift force on a kind of aircraft to the force generated by the multiplication of dynamic pressure and planform area of the body. It is a very important coefficient because it affects the aerodynamic performance of an aircraft, stall phenomena and flight stability. The stall is a very important parameter that affects aerodynamic efficiency, the performance, and stability of aircraft. The lift coefficient, C_L , gets higher by an increasing angle of attack and when the vortices start to break on a very close region to the apex of the wing the lift coefficient, C_L attenuates by an increasing angle of attack. This situation is known as a stall. Moreover, maximum lift coefficient, C_L determines the minimum speed at which an airplane can fly. So that reason, the measurement, and interpretation of the lift coefficient are very significant. Researchers generally measure the lift coefficient, C_L by utilizing models in a wind tunnel. In the wind tunnel, the lift coefficient, C_L can be measured by setting the velocity, density, and planform area of the body. The lift coefficient, C_L , includes the influences of air viscosity and compressibility. To accurately measure the lift coefficient, we must ensure that the influence compressibility and air viscosity are identical between the measurement and prediction case. On the contrary case, the prediction will not be accurate. The lift coefficient, C_L occurs due to the pressure difference between the

upper and lower surfaces of the delta wing. When an angle of attack, α is introduced to the delta wing, there will be a pressure difference between suction and pressure surfaces of the delta wing thus lift force is developed on the surface of the wing. The lift coefficient, C_L can be increased or decreased by altering the angle of attack, α the shape of the model, and the velocity of the flow. Furthermore, the lift coefficient, C_L on an aircraft changes with time for the same angle of attack, flow velocity and model geometry due to unsteady and complex flow structures as well as an irregular breakdown of vortices.

One of the most critical stages of the whole flight of an aircraft is the take-off and landing conditions. Because during the take-off and landing procedures, the flow physics and aerodynamic properties of an aircraft significantly alter from the critical characteristics of the unbounded flow region. During the take-off and landing stages, there is an inevitable interaction between the ground surface and the lower surface of the wing. So that reason, it is vitally important to investigate, understand and interpret the ground effect on the aerodynamics of aircraft. Even though most of the studies related to the structure of vortical flow and aerodynamic performance of delta wings are present in the literature, there aren't enough studies about the ground effect on the aerodynamic characteristics of delta wings. In the investigation of Kawazoe and Morita [5], as the delta wing approaches the ground, lift and drag coefficients, C_L and C_D augment, and rolling moment coefficient, C_M are effected by the existence of the ground effect, particularly at higher α 's. According to Lee et al. [6], lift and drag coefficients, C_L and C_D , were detected to increase by increasing anhedral as the distance between the ground and trailing edge of the anhedraled reversed delta wing gets smaller. Tumse et al. [7] concluded that lift and drag coefficients, C_L and C_D , get higher with descending from the unbounded flow region under the ground effect at each angle of attack. According to them, the most effective dimensionless ground distance normalized by chord length, h/c is 0.1 in terms of the aerodynamic performance since the highest C_L/C_D ratio is

acquired at $h/c=0.1$. An increase in aerodynamic performance developed by the ground effect can be interpreted in the ram pressure effect caused by the ground effect, which is the stagnation of air between the ground and the wing surface. According to Lee and Ko [8], lift enhancement was observed to be highest at lower angles of attack and ground distances, h/c and this augmentation deteriorates by increasing h/c and α . Qu et al. [9] pointed out that lift, drag and nose-down moment coefficient gets higher with reducing ground proximity, h/c . According to them, the induced drag attenuates since the forming of weak wing-tip vortices and movement of vortices far away from the wing surface. Ahmed et al. [10] emphasized that the lift coefficient augments when the distance between wing and ground reduces at high angles of attack, α due to the RAM pressure effect and air cushion between airfoil surface and ground. But at low α , C_L deteriorates as ground distance, h/c reduces due to the passage of converging-diverging flow in the region between airfoil and ground surfaces.

In order to reduce the number of a necessary experiment like pressure and force measurements in the wind tunnel and improve the control system, an artificial neural network (ANN) is an encouraging model due to the significant learning capability for linear and nonlinear systems. The aerodynamic characteristics of the aircraft equipped with various kinds of wings and the impacts of the flow control methods play a significant position in wind tunnel investigations. In these investigations, it is necessary to carry out a number of experiments such as the lift force, drag force, pressure and velocity measurements. Due to these high number of experiments, time, and cost requirements, researchers are encouraged to perform numerical and theoretical studies. The artificial neural network (ANN), which is one of the most important ones among these numerical studies, attracts much attention because of its ability to model complicated nonlinear systems [11-13].

In fluid mechanics, artificial neural networks are generally employed in Particle Image Velocimetry (PIV) measurements [14-16] and flow control

applications [17-19]. Akbiyik and Yavuz [20] developed an ANN model to estimate the lift and drag coefficients, C_L and C_D on the NACA 2415 airfoil with and without plasma actuators. According to their study, the maximum error of lift and drag coefficients, C_L and C_D prediction, was 23.705% and 12.84%. Moreover, they stated that the developed ANN model could be successfully used to estimate aerodynamic coefficients of the airfoil without the necessity of comprehensive experimental studies. In the study of Sarioglu et al. [21], the drag forces of a truck trailer equipped with a spoiler were predicted by an artificial neural network (ANN). They computed the mean absolute percentage error (MAPE) as 2.24%, 3.75% and 4.58% during training, validation, and testing stages, respectively, in the estimation of drag forces. A neural network could correctly learn the aerodynamic behavior of a delta wing having a sweep angle of $\Lambda=70^\circ$ under large-amplitude pitch oscillations [22]. Rokhsaz and Steck [23] revealed that the extremely nonlinear aerodynamic characteristics of an aircraft could be generalized with enough correctness for design objectives. Even though the neural network can be successfully generalized the aerodynamic properties in design and analysis problems, they seem deficient in terms of robustness for the characteristics of dynamic systems. Alkhedher and Al-Arife [24] developed neural networks and an adaptive neuro-fuzzy logic interference system to estimate the pitching moment and aerodynamic normal force coefficients of different shaped wing aircraft under high angles of attack. Based on the comprehensive analysis of suggested prediction methods, the ANN demonstrated lower mean squared errors during modeling and testing stages. In the study of Gomec and Canibek [25] feed forward neural network (MLP) model having four layers together with two hidden layers was established and approved. According to their model, the Levenberg-Marquart backpropagation method was used as a training algorithm. In this study, Mach number, angle of attack, side slip angle was used in the input layer and drag force, lift force, side and roll moment was used in the output layer.

Ignatyev and Khrabrov [26] developed a neural network model to predict the aerodynamic characteristics of canard aircraft at high angles of attack. The aircraft is equipped with leading-edge extension (LEX) and a canard surface with a high sweep angle. In this study, several approaches were carried out to estimate the aerodynamic performance of canard aircraft. They stated that recurrent neural network (RNN) trained bayesian regularization heteroscedastic data (BRHD) algorithm demonstrated that better conclusions regarding estimation ability compared to the neural network (NN) trained one. Moreover, the generalization ability of RNN was found to be better compared to NN one. Secco et al. [27] evaluated the various ANN architectures to predict aerodynamic coefficients on wing-body combinations constituted of generic airfoils. In this study, many numbers of data, nearly 100.000 to train and develop the ANN model. The number of neurons in ANN architecture was determined regarding the minimum mean squared error. According to this study, the mean absolute error (MAPE) was calculated as 0.0041 for the estimation of lift coefficient, C_L , and computation cost gets reduced by generated ANN model compared to computational fluid dynamics (CFD). Rai and Madavan [28] developed a neural network to estimate the aerodynamic characteristics of turbomachinery airfoils. In this study, pressure distribution data were used during the training process. They revealed that the neural network could be accurately used for the design of the airfoil.

The purpose of this investigation is to estimate the lift coefficient, C_L of a non-slender delta wing under the ground effect by an artificial neural network (ANN) and to report the estimation capability of the developed ANN model for this kind of application.

2. MATERIAL VE METHOD

2.1. Experimental Setup of Lift Coefficient Measurements

The measurement of lift coefficients, C_L , was carried out in a wind tunnel with a square cross-

section of 570 mm x 570 mm x 1000 mm. This wind tunnel has a turbulence intensity of smaller than 0.1% [29]. By using a vibration suppressor, the vibrations from the fan are eliminated. The engine of the fan, which provides flow in the tunnel has a power of 4 kW and has a diameter of 700 mm. The air inside the tunnel is discharged from the outlet hose into the atmosphere. Telemecanique Altivar 17 brand (11 kW) frequency converter control unit is utilized to obtain the desired airspeed within the range of 0-50 Hz. The lift coefficient, C_L measurement was performed at angles of attack within range of $2^\circ \leq \alpha \leq 29^\circ$ with an interval of 3° . The C_L was computed according to Equation 1. In Equation 1, where F_L is measured lift force of the delta wing, ρ is the density of the fluid which is equal to $\rho=1 \text{ kg/m}^3$ at measurement condition, U_∞ is the velocity of the fluid flow which is equal to $U_\infty=16.57 \text{ m/s}$ and A is the planform area of the wing, $A = 0.5 \times b \times c$ where b and c is the span and chord length of the wing, respectively. Akbiyik et al. [30] computed the uncertainty of force measurement in the same wind-tunnel utilizing the identical measurement techniques for similar geometry with this investigation is nearly $\pm 5\%$. The Reynolds number was handled as $Re=1.296 \times 10^5$ based on the chord length of the wing. The maximum blockage ratio which is described as the proportion of wing's frontal area to the cross-sectional area of the wind tunnel was calculated as 6%.

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho U_\infty^2 A} \quad (1)$$

In this study, the distance between wing and ground, h , is nondimensionalized with the chord length, c of the wing. The normalized ground distances, $h/c= 1, 0.7, 0.55, 0.4, 0.25$ and 0.1 were used. Actually, the normalized ground distance, $h/c=1$, corresponds to the out-of-ground effect region, in other words, the ground-free case. The ground-free case is a circumstance that happens as an aircraft flies in the unbounded flow area which is outside of the region where the ground effect is felt. For detailed information about this subject and the schematic demonstration of the experimental setup, please refer to Tumse et al. [7]. The upper section

of the wind tunnel was used to represent the ground. In lift coefficient measurements, the Reynolds number was taken as $Re=1.296 \times 10^5$ with corresponding free-stream air velocity, $U_\infty=16.57$ m/s. The chord length of the wing used in this study is 14 cm. Also, the wing has a sweep angle of $A=40^\circ$ thickness of $t=5$ with 45° sharp leading-edges. The schematic representation of this delta wing and input parameters for ANN, h , and c are demonstrated in Figure 1.

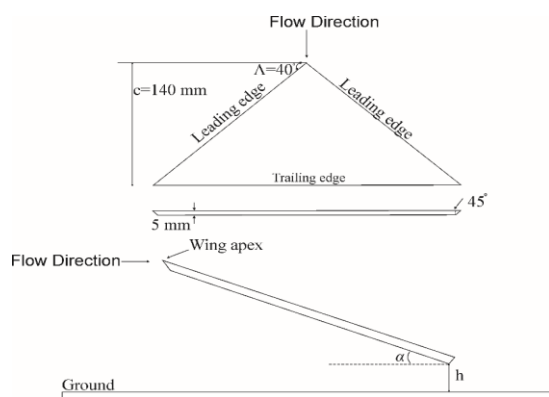


Figure 1. The schematic representation of the delta wing and input parameters of ANN, h and c

2.2. Artificial Neural Network

An artificial neural network is encouraged from the human neural network, as stated by Bishop [31]. A neural network can be regarded as a mathematical function changing nonlinearly that supplied a connection between input and output variables. ANN is a highly nonlinear model that is simple to utilize and recognize compared to statistical methods. It is a non-parametric model whereas most statistical methods are a parametric model that requires an advanced background of statistics. ANN is applied when one has minor or even no information on the structure and form of the input and output mapping. It generally can supply more flexibility in fitting non-linear mapping in high dimensional datasets than curve fitting or regression methods. The ANN model can be carried out accurately in various areas of mathematics, meteorology, medicine, thermodynamic applications, economics, robotic controls, heat and

electrical load predictions, and many other fields [32-34]. The structure of the developed ANN model, which is known as Feed Forward Neural Network, is demonstrated in Figure 2. This generated ANN model is constituted of input, hidden, and output layers. Output value can be computed with respect to Equation 1.

$$F=f(a+\sum_1^3 v_j + [\sum_1^2 g(w_{ij}x_i+b_j)]) \quad (2)$$

In Equation 2, F is the predicted value, a is the output's bias value, v_j is the weight for the value of output, w_{ij} is the weight for the input layer, b input's bias value, and x is the variable for the input. The activation function of the input and output are denoted as f and g in Equation 2. The angle of attack, α , and normalized ground distance, h/c are the input parameters, whereas lift coefficient, C_L is the output parameter of the generated ANN model. A total of 60 data is utilized for the training and testing process in the developed ANN model. The 50 data of these 60 data was used in the training process, whereas the rest for the testing process. The logistic sigmoid function (logsig) was used as an activation function in the hidden layer, whereas the linear transfer function (purelin) was employed as an activation function in the output layer. The expressions of logsig and purelin functions are demonstrated in Equations 3 and 4, respectively. The Levenberg-Marquart (LM) learning algorithm was employed in this simulation. In this study, a different number of neurons from 2 to 10 in the hidden layer was tested, and the best one for the prediction of lift coefficient in terms of MAPE, MAE, and RMSE was selected. The best results for the prediction of lift coefficient, C_L were acquired when the number of neurons is 3.

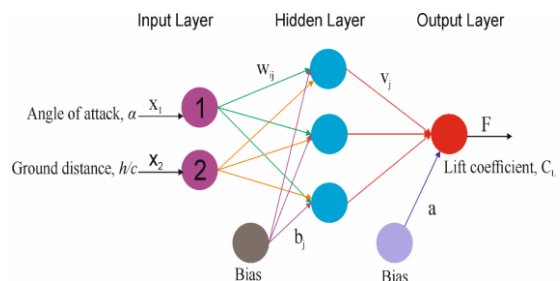


Figure 2. The structure of the developed ANN model

$$f(a) = \frac{1}{1+e^{-a}} \quad (3)$$

$$\text{purelin}(a) = a \quad (4)$$

2.3. Accuracy Assessment of Estimated Parameters

Mean absolute percentage error (MAPE) is a measure of closeness of estimated value to the actual value. Sometimes the MAPE can be stated as a percentage. It generally expresses the error of forecasting.

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (5)$$

where A is the actual value and F is the forecasting value.

The mean absolute error (MAE) states the absolute error between predicted and real values. It is computed as the ratio of the sum of the difference between predicted and real values to the number of observations.

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (6)$$

The root mean square error (RMSE) is defined as the root of the mean square error which is the ratio of the sum of the square of the difference between predicted and real values to the number of observations.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (7)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 represents the comparison between measured and estimated values of lift coefficient, C_L with the angle of attack, α in case of ground distance, $h/c=0.4$ during the testing period. As inferred from this Figure, the estimated lift coefficient values, C_L by ANN model, demonstrates an almost identical trend with experimentally measured ones. For example, while the lift coefficient, C_L is experimentally measured as 0.4296, 0.7532, and 0.7177 at angles of attack, $\alpha=8^\circ$, 17° and 26° , respectively, they estimated as 0.4456, 0.7527 and 0.7048, respectively by the developed ANN model. So, it can be said that the prediction performance of generated ANN model is very good during the testing period which includes the case of $h/c=0.4$.

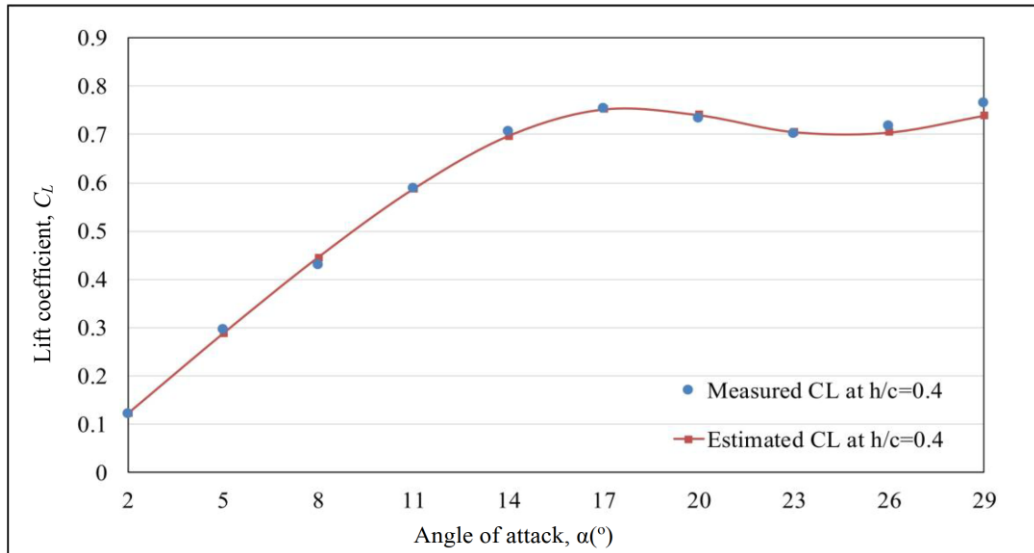


Figure 3. Comparison of actual and predicted lift coefficients, C_L of a non-slender delta wing in case of ground distance, $h/c=0.4$ during the testing process

The performance values such as MAPE, RMSE, and MAE for the estimation of lift coefficient, C_L in case of normalized ground distance, $h/c=0.4$ during the testing case are demonstrated in Table 1. MAPE, MSE, and MAE are displayed in order to assess the estimation accuracy of generated ANN model. As reported by Lewis [34], the estimation assessment is rather correct if the value of MAPE is smaller than 10%. As seen in Table 1, the MAPE value is 1.6% for the estimation of lift coefficient, C_L in case of ground distance, $h/c=0.4$. So, it denotes that the generated ANN model has excellent accuracy. It should be mentioned that if the value of RMSE equals 0 or very close to 0, the estimation performance is rather correct. As observed in Table 1, the value of RMSE is 0.0114. So, it can be said that the error between real and estimated values is very low. As seen in Table 1, the value of MAE is found as 0.0086 during the prediction of lift coefficient, C_L in the case of $h/c=0.4$. This MAE value can be regarded as highly acceptable for the

prediction of lift coefficient, C_L . Figure 4 shows the correlation between the experimental and estimated values of lift coefficient, C_L , with the angle of attack, α , generated by the ANN model. Regression value, R specifies the relationship between measured and estimated lift coefficient, C_L . As seen in Figure 4, the regression value, R , is almost equal to 1; hence, the developed ANN model demonstrates excellent consistency with experimentally measured lift coefficient, C_L .

Table 1. The values of MAPE, RMSE, and MAE for the estimation of lift coefficient, C_L in case of normalized ground distance, $h/c=0.4$ during the testing case

TESTING ($h/c=0.4$)		
MAPE	RMSE	MAE
1.60%	0.0114	0.0086

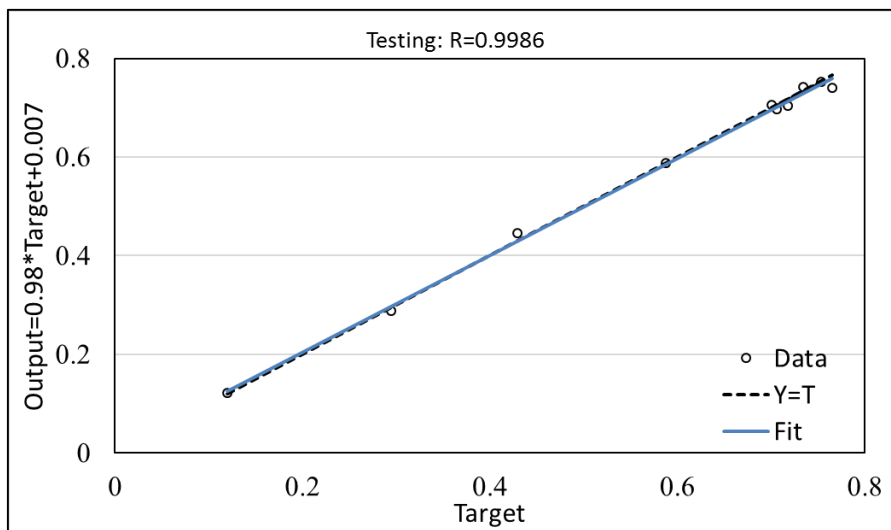


Figure 4. Relation between actual and predicted values of lift coefficient, C_L for testing case

The comparison of predicted and measured lift coefficients, C_L of a 40° swept delta wing under various ground distances, h/c during the training stage is demonstrated in Figure 5. As seen in Figure 5, the predicted lift coefficient, C_L generated with ANN model are noticeably linked with measured ones demonstrating considerably correct results.

The estimated lift coefficients, C_L overlap with experimentally measured lift coefficients, C_L independent of angles of attack during the training stage. For example, at $h/c=0.7$, while lift coefficient, C_L was experimentally measured as 0.568, 0.701 and 0.7 at $\alpha=11^\circ$, 20° and 29° , respectively, they are predicted as 0.571, 0.7 and

0.688 at $\alpha=11^\circ$, 20° and 29° , respectively by developed ANN model. As observed from Figure 5, the lift coefficient, C_L augments by reducing normalized ground distance, h/c . For instance, at $\alpha=14^\circ$, while C_L is equal to 0.673 for $h/c=0.7$, it is found as 0.741, 0.836 for $h/c=0.25$ and 0.1, respectively. The lift increment can be attributed to the ground effect induced RAM pressure and dynamic air cushion in the region between the ground surface and wing's pressure surface. As noticed in Figure 5, the maximum lift coefficient is acquired at $\alpha=17^\circ$ and the C_L starts to decrease beyond $\alpha=17^\circ$ thus, it can be said that the stall phenomena takes place after $\alpha=17^\circ$. While the C_L attenuates up to the $\alpha=23^\circ$, it again increases when the angle of attack alters from $\alpha=23^\circ$ to $\alpha=26^\circ$ and 29° . This situation can be interpreted to the high-level fluid-structure interactions that end up with remarkable lift augmentation in the post-stall region which is also reported in the excellent review of Gursul et al. [1]. This flow physics is a specific property of non-slender delta wings. The regression value, R which denotes the relation of real and estimated lift coefficient, C_L was found to very close to the 1 for all ground distances, $h/c=1, 0.7, 0.55, 0.25$ and 0.1 during the training stage as observed from Figures 6 and 7. So, it can be said that the estimation performance of generated ANN model is

very accurate during the training stage. Table 2 displays the assessment of the performance of the generated ANN model via MAPE, RMSE, and MAE values during the training stage. Moreover, in Table 3, these performance values are given separately for all ground distances, h/c constituting the training stage. Table 2 and Table 3 show that the MAPE, RMSE, and MAE are within the acceptable ranges. The MAPE value in the training stage which consists of $h/c=1, 0.7, 0.55, 0.25$, and 0.1 , is 1.77% and higher than the MAPE value in the testing stage consisting of $h/c=0.4$ which has already computed as %1.6. When Table 3 is examined carefully, it can be observed that the MAPE, RMSE, and MAE values get higher with reducing ground distances, h/c , during the training process. For example, when the MAPE, RMSE and MAE are 1.18%, 0.0065, 0.0052 at $h/c=0.7$, 1.42%, 0.0082, 0.0065 at $h/c=0.55$, they equal to 2.57%, 0.0136, 0.0123 at $h/c=0.1$, respectively. This situation can be attributed to the more unsteady, complex, and disorganized flow structures by reducing the normalized ground distance, h/c between wing and ground surface. These complex and disorganized flow structures may cause sudden changes in aerodynamic forces and fluctuations in the values of aerodynamic forces.

Table 2. The values of MAPE, RMSE, and MAE for the estimation of lift coefficient, C_L during training case including all h/c

TRAINING (including all cases)		
MAPE	RMSE	MAE
1.77%	0.01	0.0080

Table 3. The values of MAPE, RMSE, and MAE for the estimation of lift coefficient, C_L during training case for $h/c=1, 0.7, 0.55, 0.25$ and 0.1 separately

Ground distance	TRAINING		
	MAPE	RMSE	MAE
$h/c=1$	1.91%	0.0089	0.0076
$h/c=0.7$	1.18%	0.0065	0.0052
$h/c=0.55$	1.42%	0.0082	0.0065
$h/c=0.25$	1.76%	0.0110	0.0083
$h/c=0.1$	2.57%	0.0136	0.0123

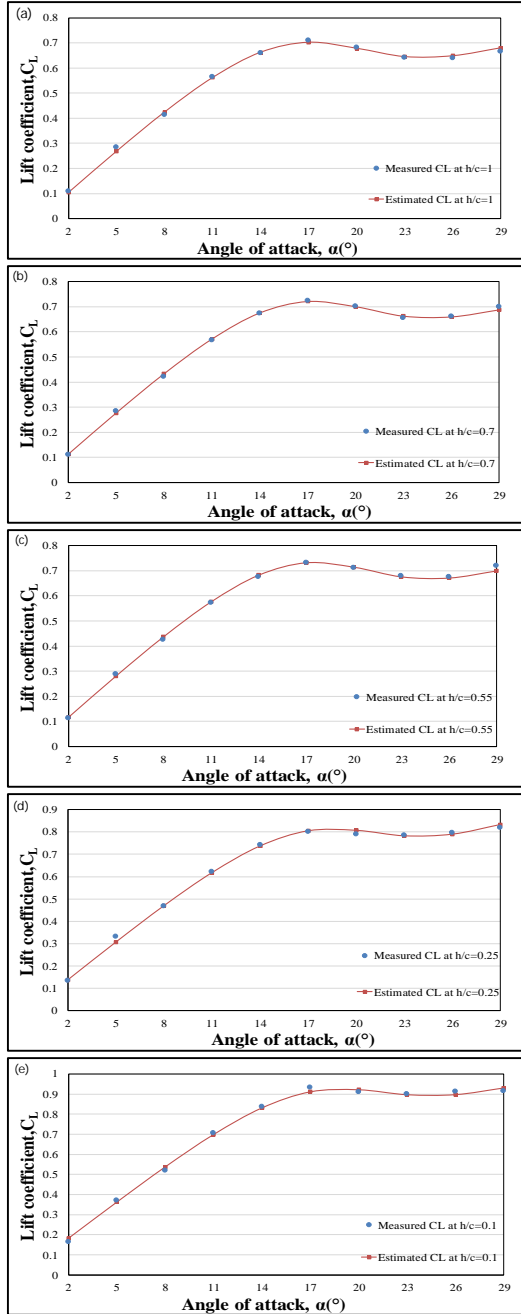


Figure 5. Comparison of actual and predicted lift coefficients, C_L of a non-slender delta wing in case of ground distance, a) $h/c=1$, b) $h/c=0.7$, c) $h/c=0.55$, d) $h/c=0.25$, e) $h/c=0.1$ during training process

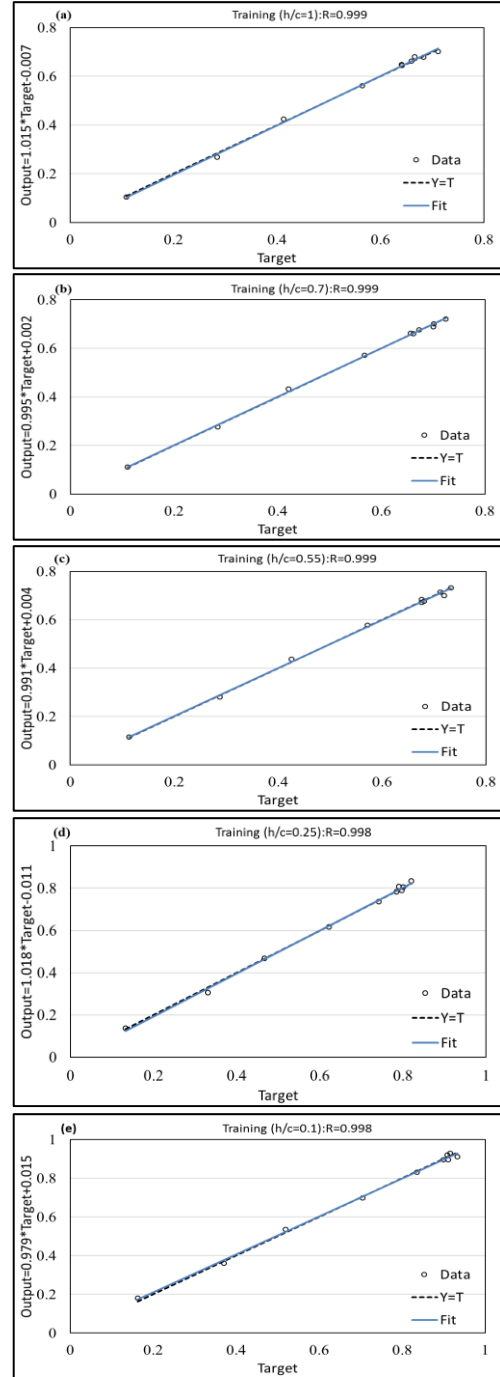


Figure 6. Relation between actual and predicted values of lift coefficient, C_L for training case of a) $h/c=1$, b) $h/c=0.7$, c) $h/c=0.55$, d) $h/c=0.25$, e) $h/c=0.1$

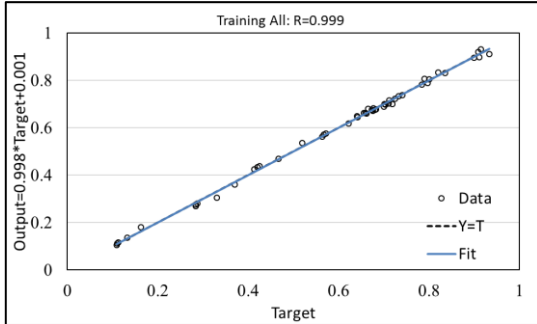


Figure 7. Relation between actual and predicted values of lift coefficient, C_L for training case including all h/c

4. CONCLUSIONS

The available experimental results were presented to reveal the ground effect on the change of lift coefficient, C_L of a non-slender delta wing. The purpose of the current study is to improve a model that can be used to predict lift coefficient, C_L acting on the non-slender delta wing under the ground effect by utilizing the input parameters of normalized ground distance, h/c , and angle of attack, α . The conclusions acquired with the ANN model are compared with each other and measured (actual) data. The founded error values are within reasonable limits. For example, the MAPE, RMSE, and MAE values are found as 1.60%, 0.0114 and 0.0086 respectively for the estimation of lift coefficient, C_L in case of normalized ground distance, $h/c=0.4$ during the testing case. The prediction of lift coefficient, C_L with the ANN model, follows the change of experimentally measured values exactly in the testing stage. The MAPE value in the training stage which consists of the combination of predicted lift coefficients, C_L in cases of $h/c=1, 0.7, 0.55, 0.25$, and 0.1 was found as 1.8%, and this value is higher than the MAPE value in the testing stage consisting of $h/c=0.4$ which has already computed as 1.6%. In the training stage, the MAPE, RMSE, and MAE values increase with reducing ground distances, h/c . For instance, when the MAPE, RMSE and MAE are 1.18%, 0.0065 and 0.0052 at $h/c=0.7$, they are equal to 2.57%, 0.0136 and 0.0123 at $h/c=0.1$ respectively. This situation can be attributed to the more unsteady, complex, and disorganized flow structures by reducing the

normalized ground distance, h/c between wing and ground surface. The regression value, R which denotes the relationship between actual and estimated lift coefficients, C_L was found as very close to the 1 in training and testing stages which shows the excellent prediction accuracy of the developed ANN model. This study demonstrated that the ANN model could be accurately employed in the aerodynamic coefficient prediction in order to decrease the number of experiments; thus, it is possible to save time and cost

5. REFERENCES

1. Gursul, I., Gordnier, R., Visbal, M., 2005. Unsteady Aerodynamics of Nonslender Delta Wings. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(7), 515-557.
2. Ol, M.V., Gharib, M., 2003. Leading-Edge Vortex Structure of Nonslender Delta Wings at Low Reynolds Number. *AIAA Journal*, 41(1), 16-26.
3. Gursul, I., Allan, M., Badcock, K., 2005. Opportunities for the Integrated Use of Measurements and Computations for the Understanding of Delta Wing Aerodynamics. *Aerospace Science and Technology*, 9(3), 181-189.
4. <https://www.grc.nasa.gov/www/k12/airplane/liftco.html>. Erişim Tarihi: 08.06.2021.
5. Kawazoe, H., Morita, S., 2004. Ground Effect on the Dynamic Characteristics of A Wing-Rock Delta Wing. 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.
6. Lee, T., Tremblay-Dionne, V., Ko, L., 2018. Ground Effect on a Slender Reverse Delta Wing with Anhedral. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(4), 1516-1525.
7. Tumse, S., Tasci, M. O., Karasu, I., Sahin, B., 2021. Effect of Ground on Flow Characteristics and Aerodynamic Performance of a Non-slender Delta Wing. *Aerospace Science and Technology*, 110, 106475.
8. Lee, T., Ko, L. S., 2018. Ground Effect on the Vortex Flow and Aerodynamics of a Slender Delta Wing. *Journal of Fluids Engineering*, 140(7).

9. Qu, Q., Lu, Z., Guo, H., Liu, P., Agarwal, R. K., 2015. Numerical Investigation of the Aerodynamics of a Delta Wing in Ground Effect. *Journal of Aircraft*, 52(1), 329–340.
10. Ahmed, M.R., Takasaki, T., Kohama, Y., 2007. Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect. *AIAA Journal*, 45(1), 37–47.
11. Narendra, K., Parthasarathy, K., 1990. Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1(1), 4-27.
12. Hunt, K., Sbarbaro, D., Zbikowski, R., Gawthrop, P., 1992. Neural Networks for Control Systems-A Survey. *Automatica*, 28(6), 1083-1112.
13. Calise, A.J., Rysdyk., R.T., 1998. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *IEEE Control Systems Magazine*, 18, 14-25
14. Gim, Y., Jang, D.K., Sohn, D.K., Kim, H., Ko, H.S., 2020. Three-dimensional Particle Tracking Velocimetry Using Shallow Neural Network for Real-time Analysis. *Experiments in Fluids*, 61(2).
15. Rabault, J., Kolaas, J., Jensen, A., 2017. Performing Particle Image Velocimetry Using Artificial Neural Networks: A Proof-of-Concept. *Measurement Science and Technology*, 28(12), 1-14.
16. Cai, S., Liang, J., Gao, Q., Xu, C., Wei, R., 2020. Particle Image Velocimetry Based on a Deep Learning Motion Estimator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 3538-3554.
17. Rabault, J., Kuhnle, A., 2019. Accelerating Deep Reinforcement Learning Strategies of Flow Control through a Multi-environment Approach. *Physics of Fluids*, 31(9), 094105.
18. Tang, H., Rabault, J., Kuhnle, A., Wang, Y., Wang, T., 2020. Robust Active Flow Control over a range of Reynolds Numbers Using an Artificial Neural Network Trained Through Deep Reinforcement Learning. *Physics of Fluids*, 32(5), 053605.
19. Belus, V., Rabault, J., Viquerat, J., Che, Z., Hachem, E., Reglade, U., 2019. Exploiting Locality and Translational Invariance to Design Effective Deep Reinforcement Learning Control of the 1-Dimensional Unstable Falling Liquid Film. *AIP Advances*, 9(12), 125014.
20. Akbiyik, H., Yavuz, H., 2021. Artificial Neural Network Application for Aerodynamics of an Airfoil Equipped with Plasma Actuators. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14(4), 1165-1181.
21. Akansu, Y.E., Sarioğlu, M., Seyhan, M., 2016. Aerodynamic Drag Force Estimation of a Truck Trailer Model Using Artificial Neural Network. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 5(4), 168-175.
22. Rokhsaz, K., Steck, J.E., 1993. Use of Neural Networks in Control of High-alpha Maneuvers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16(5), 934-939.
23. Rokhsaz, K., Steck, J.E., 1993. Application of Artificial Neural Networks in Nonlinear Aerodynamics and Aircraft Design. *SAE Technical Paper Series*.
24. Alkhedher, M., Al-Arife, Khaled., 2019. Estimation and Prediction of Nonlinear Aerodynamics using Artificial Intelligence. 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW).
25. Gomec, F.S., Canibek, M., 2017. Aerodynamic Database Improvement of Aircraft Based on Neural Networks and Genetic Algorithms. 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (Eucass).
26. Ignatyev, D., Khrabrov, A., 2018. Experimental Study and Neural Network Modeling of Aerodynamic Characteristics of Canard Aircraft at High Angles of Attack. *Aerospace*, 5(1), 26.
27. Secco, N.R., Mattos, B.S., 2017. Artificial Neural Networks to Predict Aerodynamic Coefficients of Transport Airplanes. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 89(2), 211-230.
28. Rai, M.M., Madavan, N.K., 2001. Application of Artificial Neural Networks to the Design of Turbomachinery Airfoils. *Journal of Propulsion and Power*, 17(1), 176-183.
29. Akbiyik, H., Yavuz, H., 2020. Dbd Plazma Aktiator Srm Frekansının Uak Kanadı Etrafındaki Akışın Kontrolne Etkisinin İncelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 522–528.

30. Akbiyik, H., Yavuz, H., Akansu, Y.E., 2017. Comparison of the Linear and Spanwise-Segmented Dbd Plasma Actuators on Flow Control around a Naca0015 Airfoil. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(11), 2913-2921.
31. Bishop, C.M., 1994. Neural Networks and Their Applications. *Review of Scientific Instruments*, 65, 1803-1832.
32. Ozbek, A., 2016. Yapay Sinir Ağları Kullanarak Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 51-58.
33. Hosoz, M., Ertunc, H.M., Bulgurcu, H., 2007. Performance Prediction of a Cooling Tower Using Artificial Neural Network. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1349-1359.
34. Senkal, O., 2016. Yapay Sinir Ağları ile Atmosferik Parametreler Kullanılarak Türkiye için Güneş Radyasyonu Modellemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 179-186.
35. Lewis, C.D., 1982. *Industrial and Business Forecasting Methods*. Butterworth Scientific, London.

Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi

Adem ERİK¹, Yusuf KUVVETLİ*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 25.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

İnternetin, sistemlerin fiziksel ve siber entegrasyonu ile dönüşümü dördüncü sanayi devrimi olarak anılan Endüstri 4.0 (I4.0) kavramını ortaya çıkarmıştır. Birçok teknolojinin bir araya gelmesi bulut teknolojisi, dijitalleşme, büyük veri ve nesnelerin interneti gibi kavramlar ile yeni bir üretim modeli oluşmaktadır. I4.0 tabanlı bir üretim modeline geçmek isteyen bir işletme için önemli bir süreç ve teknoloji hazırlığı ve altyapı ihtiyacı oluşmaktadır. Bu nedenle, işletmeler dönüşüm için öncelikle bu modeli içeren yönetim şekli, süreç ve teknolojilerine olan uyumu sağlamak zorundadır. Bu çalışmada, farklı üretim firmalarında gerçekleştirilen yüz yüze görüşmeler sonucunda elde edilen verilerle işletmelerin I4.0 entegrasyon yeteneği analiz edilmiştir. Veriler, veri zarflama analizi ile değerlendirilmiş ve işletmelerin I4.0 uyum yeteneği göreceli olarak saptanmıştır. İşletmeler değerlendirilirken bilgi teknolojileri, araştırma-geliştirme faaliyetleri, müşteri ilişkileri, finansman, kalite yönetimi, planlama, maliyet yönetimi vb. birçok farklı başlık altında analiz edilerek detaylı bir değerlendirme yapılması sağlanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda incelenen 24 imalat işletmesinin 13'ü dönüşüm için etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Endüstri 4.0 Entegrasyonu, Veri zarflama analizi, Üretim yönetimi

Evaluation of Industry 4.0 Integration of Manufacturing Enterprises with Data Envelopment Analysis

Abstract

The internet and the transformation of physical and cyber systems' integration have created Industry 4.0 (I4.0), referred to as the fourth industrial revolution. Combining many technologies forms a new production model with concepts such as cloud technology, digitalization, big data, and the internet of things. A necessary process and technology preparation, and infrastructure need arise for an enterprise that wants to switch to an I4.0-based production model. For this reason, businesses must first ensure compliance with the management style, processes, and technologies that include this model for transformation. In this study, the I4.0 integration capability of the enterprises was analyzed with the data obtained from face-to-face interviews conducted in different manufacturing companies. The data were evaluated with the Data Envelopment Analysis technique, and the I4.0 compliance capability of the enterprises was determined relatively. A detailed evaluation has been achieved by analyzing various

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yusuf KUVVETLİ, ykuvvetli@cu.edu.tr

aspects such as information technologies, R&D activities, customer relations, financing, quality management, planning, and cost management. As a result of the evaluation, it was concluded that 13 of the 24 manufacturing enterprises examined were effective for transformation.

Keywords: Industry 4.0, Industry 4.0 Integration, Data envelopment analysis, Production management

1. GİRİŞ

Ürün ve hizmet ortaya koyan işletmeler arasında var olan rekabet dijitalleşme, siber fiziksel sistemler, büyük veri, nesnelerin interneti vb. I4.0 kavramlarının etkisini göstermesi ile farklı bir eksene taşınmaya hazırlanmaktadır. İlk olarak Almanya'da açıklanan I4.0, akıllı fabrikalar kurmak için siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim gibi üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır [1]. Artan rekabet özellikle üretim işletmelerini üretim alışkanlıklarını ve teknolojisini değiştirmeye zorlamaktadır. I4.0 teknolojileri ile işletmelere dijital çözümler sunarken şirketlerin sunulan çözümleri nasıl kullandığı ile ilgili bir anlayış mevcut değildir [2].

I4.0 üretim sistem teknolojilerini akıllı üretim süreçleri ile birleştirerek iş modelleri ve üretim değer zincirleri için yeni bir teknolojik çağ olarak görülmektedir. Bu çağ ile tedarik zincirleri bütünleşik olarak birden çok sektörde küçük, orta ve büyük ölçekli şirketlerdeki fiziksel süreçlerin ve bilgi akışların gerektiği yerde ve zamanda kullanılması sağlanmaktadır [3]. Tüm bu sistem ile sağlanan akıllı üretim, cihazların veya makinelerin geçmiş deneyimlere ve öğrenme kapasitelerine dayalı olarak farklı durumlara ve gereksinimlere göre davranışlarını değiştirmesini sağlamak için belirli temel teknolojiler gerektirir [4].

Akıllı üretimi gerçekleştirmek için gereken teknolojiler, üretim sistemlerine entegre edilerek doğrudan iletişim sağlayan ve zamanında problemlerin çözülmesi ve uyarlanabilir kararların alınmasına olanak tanır. Bazı teknolojiler buna ek olarak gerçek zamanlı, akıllı ve her yerde bulunan endüstriyel uygulamaları hayata geçirmek için deneyimlerden yararlanan yapay zekaya (YZ)

sahiptir [5]. Tüm bu nedenlerden dolayı I4.0 çözümleri yapı bakımından güçlü teknolojik altyapı gerektirmektedir. Bu anlamda, I4.0 entegrasyonunu sağlamak isteyen işletmelerin bilişim ve üretim teknolojilerini geliştirmeleri gerekmektedir.

Bu makalede, Adana çevresinde faaliyet gösteren üretim firmalarından görüşmeler sonucu elde edilen verilerle işletmelerin I4.0'ı uygulayabilme ve entegrasyon yeteneği için değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Toplanan veriler; bilgi teknolojileri, araştırma-geliştirme faaliyetleri, müşteri ilişkileri, finansman, kalite yönetimi, planlama, maliyet yönetimi vb. birçok farklı başlık altında analiz edilmiş ve Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılarak detaylı değerlendirmeler yapılması sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

I4.0 tanıtıldığı 2011 yılından bugüne özellikle üretim işletmelerinde yoğun ilgi görmüş ve çeşitli şekillerde işletmelerin bünyelerine kazandırılmaya çalışılmıştır. Özellikle farklı teknolojik altyapısı ve entegrasyon zorlukları barındıran I4.0 teknolojileri için literatürde farklı çerçeveler çizilmiş ve karşılaşılan problemler tartışılmıştır. I4.0'ın yapı taşlarını oluşturan büyük veri ve analizi, otonom robotlar, simülasyon, yatay ve dikey sistem entegrasyonu, endüstriyel IoT, siber güvenlik, bulut teknolojisi, katmanlı üretim ve artırılmış gerçeklik üzerinde durularak işletmelerin I4.0'a geçmeleri için gerekli önerilerde bulunulmuştur [6]. Buna göre işletmeler önceliklerini belirlemeli ve nitelikli işgücünü yükseltmeli, tedarikçiler teknolojilerden yararlanmalı ve son olarak altyapı ve eğitim uyarlanmalıdır [6]. Üretim işletmelerinde kullanılan I4.0 teknolojileri (IoT, siber fiziksel sistemler, bulut tabanlı imalat vb.) ile ilgili yaşanan zorluklar için alternatif bir model önermiş,

yazarlar dokuz farklı boyutta (ürünler, müşteriler, işlemler, teknoloji, strateji, liderlik, yönetim, kültür, insanlar) I4.0 olgunluğu değerlendirmiştir [7]. Geliştirilen model pratik bir araca dönüştürülerek birkaç şirkette test edilmiş ve bir vaka sunulmuştur. Alınan ilk sonuçlar modelin şeffaf, kullanımının kolay ve gerçek üretim ortamlarında uygulanabilirliğini kanıtlamıştır [7]. Farklı bir çalışmada, ürün yaşam döngüsünün kısalması ve işletmelerde bulunan teknolojinin gereken üretim verimi için yeterli olmadığından yola çıkılarak yeni iş modelleri, şirketlerin rekabeti ve inovasyon boşluğu gibi konular tartışılmıştır [8]. Yazarlar zayıf veri yönetiminin maliyetlerini göz önüne aldığı I4.0'ın sunduğu çözümlerin kapsamlı ve uygulanabilir olduğunu ancak teknolojilere geçişin kapsamlı bir strateji gerektirdiği ve veri entegrasyonu, veri güvenliği, geçiş sırasında olabilecek süreç aksaklıkları, malzeme kayıpları gibi konuların dikkate alınması gerekliliğini vurgulamaktadırlar [8]. Son olarak I4.0'ın vaat ettiği bulut bilişim, katmanlı üretim vb. çözümlerin kullanımı için adım adım geçişin uygun olacağı öngörülmüştür [8]. I4.0'ın uygulanabilmesi için üretim operasyonları ve bilgi teknolojisi gibi öncelikli birkaç alan stratejiktir [9]. Bu konuda birkaç kavram ve strateji üzerinde durulmuş ve kapsanmayan alanlar için literatürden seçilen farklı kavram ve stratejiler karşılaştırılmıştır [9]. Elde edilen bulgularda I4.0 ile sektörde sürdürülebilirlik, nitelikli işgücü ve endüstrinin tüm segmentlerinde optimizasyonun sağlanabileceği öngörülmüştür [9]. Norveç'te faaliyet gösteren 4 şirkete yapılan anketler ile I4.0 teknolojilerinin nasıl uygulanabileceği belirlenmeye çalışılmıştır [10]. Elde edilen bulgular I4.0'ın üretim lojistiğinde uygulanabilirliğinin üretim ortamına bağlı olduğunu ve üretim tekrarı az olan şirketlerde malzeme akışının karmaşık olduğu üretim lojistiğinde I4.0 teknolojilerini uygulamada daha az potansiyele sahip olduğunu göstermektedir [10].

Şirket teknoloji seviyeleri I4.0'a geçiş aşamasında önemli bir faktördür [11]. Malezya şirketlerinin teknoloji kullanımları konusunda değerlendirmeler yapmak için borsadaki finansal oranları kullanan

yazarlar aynı zamanda şirketlerin verimliliğini maksimize etmek için şirket girdi ve çıktı ağırlıklarının optimum kontrolünü belirlemeye çalışmışlardır [11]. Lingo paket programında VZA modeli ile çözülen modelde incelenen şirketlerin %44'ünün teknoloji yönünden etkin olduğu görülmüştür [11]. Bir başka çalışmada değişen teknoloji ve iş modellerine karşı işletmelerin adaptasyonu için yazılım sistemleri entegrasyonun öncelikli hale geldiği belirtilmiştir [12]. İşletmelere uygulanan yazılım sistemlerinin entegrasyonlarının iş değerinin tahmini için VZA yöntemi kullanılmış ve işletme entegrasyonunda marjinal faydaların belirlenmesinde VZA yönteminin kullanımı anlatılmaktadır [12]. I4.0'nin son teknoloji incelemesinde, temel tasarım ilkeleri, mimari tasarım tanımlaması, teknoloji eğilimleri ve üreticiler için stratejik bir yol haritası sunulmuştur [13]. Yazar I4.0'ı 12 tasarım ilkesi ve 14 teknoloji trendinden oluşan bütüncül bir değer yaratma sistemi olarak tanımlamıştır [13]. I4.0'a geçişin ilk adımı olarak imalat şirketinin atması gereken her adım, zaman çizelgesi ve her adımla ilişkili maliyet ve faydaları tanımlayan ve planlayan kapsamlı bir stratejik yol haritasının geliştirilmesi olarak belirlenmiştir [13]. Dijitalleşme için çalışan 2 küçük şirket, bir orta ölçekli ve 4 büyük ölçekli şirket için öz denetime dayalı bir değerlendirme yöntemi ile dijitalleşmeye hazır olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır [14]. Ayrıca bir vaka çalışması ile dijitalleşmeye engel olan nedenler, zorluklar ve dijitalleşmeyi kolaylaştırıcıların belirlenmesi amaçlanmıştır [14]. Büyük şirketleri entegrasyon, ortak bir strateji oluşturma, daha yüksek karmaşıklık seviyesi ve farklı hedefler zorlarken veriye dayalı süreçler, tüm şirket türleri için bir boşluk olarak görülmüştür [14]. İmalat sektöründe I4.0 benimsenmesini ölçmek için AB ülkeleri genelinde I4.0'ı temsil eden faktörlerin varlığı analiz edilmiştir [15]. Analizde AB düzeyinde ülkeler arasında büyük farklılıklar gösteren 5 homojen ülke grubu bulunmuştur. Ayrıca analiz, büyük verilerle başa çıkmak için analitik yeteneklerle birleştirilmiş dijital bir altyapının varlığının, her ülkede I4.0'a hazırlığı gösteren iki boyut olarak ortaya çıktığını kanıtlamıştır [15]. I4.0'ın benimsenmesinin teknoloji sağlayıcılar

açısından sentezlemiş ve Portekiz’de teknoloji kümesinde bulunan 10 şirkette olay araştırılması yapılmıştır [16]. I4.0 teknolojilerinin (siber fiziksel sistemler, bulut bilişim, IoT, vb.) benimsenme konusundaki temel zorlukların üretilen verilerin analizi, yeni teknolojilerin mevcut ekipman ve işgücü ile entegrasyonu ve hesaplama sınırlamaları olduğunu belirlenmiştir [16]. Çalışmada iç kaynakların, ortaklarının ve diğer kümelenme şirketlerinin tamamlayıcı faaliyetleri ve bütünlük çalışmaları ile şirketin iş modelinde değişiklikler öngörülmüştür [16].

I4.0 teknolojilerinin uygulanması için öngörülen çerçeveler yapılan birçok çalışmada farklı olmaktadır. I4.0 içerisinde tanımlanan ön ve uç teknolojiler için kavramsal bir çerçeve önerilmiş, akıllı üretim, akıllı ürünler, akıllı tedarik zinciri ve akıllı çalışma için IoT, bulut hizmetleri, büyük veri ve analitik temel teknolojileri dikkate alınmıştır [2]. Ele alınan teknolojilerin uygulanması için 92 imalat işletmesinde anket gerçekleştirilmiştir. İncelenen örnekte büyük veri ve analitiğinin kullanımının hala düşük olduğu için I4.0 teknolojilerinin şirketlere uygulanmasının zor olduğu ortaya konmuştur [2]. Doğrudan yabancı yatırım barındıran fabrikaların yan kuruluşlarında gelişmiş üretim teknolojilerinin (GÜT) etkisi araştırılmıştır [17]. Macaristan’da bu konu ile ilgili bilgi toplayan yazar, üretim kapasitesinin tüm bileşenlerinin olağanüstü bir şekilde geliştirildiğini tespit etmiş ve GÜT’ün belirli Ar-Ge faaliyetlerini destekleyerek yan kuruluş düzeyindeki Ar-Ge yeteneklerinin yükseltilmesini teşvik ettiği belirlenmiştir [17].

I4.0 teknolojilerinin uygulanma stratejileri farklı üretim teknikleri ile kesişmektedir. Bu durum uygulanabilirliği etkilemekte ve üretim teknikleri arasındaki uyumun sağlanmasını gerektirmektedir. Yalın üretim ile I4.0’ın çok farklı stratejiler kullanmasına karşılık bazı ortak noktaların varlığı vurgulanmıştır [18]. Çalışmada yalın üretim prensipleri baz alınarak I4.0 teknolojileri ile ilişkisi ortaya konmuştur. Buna göre tam zamanlı üretim ve Jikoda tekniğinin I4.0 teknolojileri tarafından güçlü bir şekilde desteklendiğini ancak israf ve işgücü

kazancı ve ekip çalışması konusunda I4.0 teknolojileri çok az veya hiç destek sağlayamamıştır [18]. Bu nedenle I4.0 teknolojileri tüm yalın tekniklerini destekleyememekte ve yalın tekniklerin bazılarının hala uygulanması gerekliliği doğmaktadır [18]. İmalat şirketlerinin iş süreçlerinde teknolojileri etkinleştiren I4.0 uygulamalarının neler olduğu üzerine detaylı bir literatür araştırması içermektedir. Yazarlar 186 makaleyi analiz ederek üretim çizelgeleme ve kontrolün en sık araştırılan süreç olduğunu görmüşlerdir [19]. Aynı zamanda hizmet sağlama ve döngüsel tedarik zinciri yönetiminde de artan bir eğilim olduğu, uygulamaların geniş bir süreç yelpazesini kapsayan IoT, büyük veri analitiği ve bulut bilişimin kapsamlı birleşik kullanımını, blok zincir teknolojisinin ise çok fazla tartışılmadığı belirlenmiştir [19].

Bir çalışmada, 2008-2018 yılları arasında yayınlanan 35 makale incelenerek sürdürülebilir üretim kavramlarının ve yeni teknolojilerin kullanılmasının I4.0’ın tüm sürdürülebilirlik boyutları üzerinde entegre bir şekilde olumlu etkilere sahip olabileceği belirlenmiştir [20]. I4.0 gündemindeki sürdürülebilir hedeflere ulaşılmasını sağlamak için sürdürülebilir iş modelleri geliştirmek, sürdürülebilir ve döngüsel üretim sistemleri; sürdürülebilir tedarik zincirleri sürdürülebilir ürün tasarımı gibi konularda politika geliştirilmesini öngörmüştür [20]. Akademi ve uygulama alanından 76 uzmanı içeren Delphi tabanlı bir senaryo analizi yapan yazarlar, ortaya çıkan iş modelleri, büyüklük, giriş engelleri, dikey entegrasyon, kira dağılımı ve faaliyetlerin coğrafi konumu açısından en yaygın beklentilerin yanı sıra tartışmalı konuları vurgulamaktadır [21]. Çalışma sonunda talep özellikleri, değer zinciri katılımcıları arasında verilerin şeffaflığı, katmanlı üretimin ve gelişmiş robotiğin olgunluğu ve akıllı ürünlerin yayılması en yaygın beklentiler olarak belirlenmiştir [21].

I4.0 teknolojilerinin imalat sektöründe uygulanmasının önündeki engeller, gelişmiş ve gelişmekte olan ekonomiler bağlamında incelenmiştir [22]. Kaynak kıtlığının yanı sıra

dijital bir stratejinin olmaması en önemli engel olarak belirlenmiş ve gelişmekte olan ülkelerde Sanayi 4.0 ile ilgili koordineli ulusal politikaların eksikliğinden kaynaklanan ve firmaların I4.0 devrimini tam olarak yaşamalarını engelleyebilecek teknolojik yeniliğin yayılmasındaki zorlukları vurgulanmıştır [22]. I4.0'ın benimsenmesinin 10R (Reddet, Yeniden Düşün, Azalt, Yeniden Kullan, Onar, Yenile, Yeniden Üret, Yeniden Kullan, Geri Dönüştür ve Kurtarma) ile gelişmiş üretim yetenekleri üzerinde ne kadar büyük bir etkiye sahip olduğu ve bunun bir I4.0 dağıtım sisteminin düzenleyici etkisi altında sürdürülebilir kalkınma üzerindeki sonucu incelenmiştir [23].

3. YÖNTEM

3.1. Veri Zarflama Analizi

İlk olarak 1957'de bütün ekonomiye tek sektörden uygulanması için bir model ortaya atan Farrell bu modelin herhangi bir etkinliğin ölçümünde etkinliğin kendi arasında ayrılabilmesini öne sürmüştür [24]. VZA ise Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından 1978'de aynı çeşit mal ve hizmet üretimi yapan karar vericilerin görece faaliyetlerinin tespit edilmesi için oluşturulan bir yöntemdir [25]. VZA doğrusal programlamanın özel bir uygulamasıdır ve aynı amaçlara sahip işletmelerin verimliliğini görece bir şekilde ölçmektedir. Birçok uygulama alanı olan VZA başlıca hastaneler, okullar, bankalar, üretim şirketleri, mahkemeler vb. yerlerde uygulanabilmektedir. Bu yerlerdeki uygulamalarda benzer amaçlı departmanların karşılaştırmaları ile göreceli etkinlik değerleri elde edilmektedir [26].

Veri zarflama analizinin uygulanabilmesi için karar noktalarının seçimi, girdi ve çıktı faktörlerinin seçimi, modelin seçimi, sonuçların yorumlanması adımları gerekmektedir [27]. VZA karşılaştırmalı bir analiz olduğu için doğru karar birimlerin seçilmesi oldukça önemlidir. Bundan dolayı karar noktaları kullandıkları girdiler ve ürettikleri çıktılar yönünden benzer olmalı, tüm karar noktaları için benzer kaynaklar seti olmalı ve tüm karar noktaları benzer çevre koşullarında

çalışıyor olmalıdır [28]. Analizde kullanılan çıktılar birimlerin maddi sonuçlarını gösterdiği için karar birimlerinin amaçları yansıtılmalıdır [29].

Kullanıldığı alana ve varsayımlarına göre farklı VZA yöntemleri uygulanabilmektedir. Seçilecek yöntemin belirlenmesinde girdi ve çıktı üzerindeki denetim durumları göz önüne alınmaktadır. Girdiler üzerinde kontrolün az olması halinde çıktı odaklı modelin kullanılması, çıktılar üzerindeki kontrolün az olması halinde girdi odaklı model oluşturulmalıdır. Toplamsal modeller herhangi bir odak olmaması veya karar vericilerin etkinlikleri önemsememesi durumunda kullanılmalıdır [30]. VZA modellerinin çözümlerinde MaxDEA, DEA Solver, EMS ve DEAP gibi paket programlar sıklıkla kullanılmaktadır [27].

3.2. Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) Modeli

Veri zarflama analizinde m adet girdi ve s adet çıktıya sahip olan n adet karar verme biriminin her biri için, i. karar verme biriminin i. girdi miktarı $X_{ij} \geq 0$ ve j'inci karar verme birimi tarafından üretilen r. çıktı miktarı $Y_{rj} > 0$ 'dır.

Girdi yönelimli kesirli VZA modeli [31];

$$\text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s a_r \cdot Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m b_i \cdot X_{ik}} \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, m; \\ r=1, \dots, s; \\ j=1, \dots, n \end{array} \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s a_r \cdot Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m b_i \cdot X_{ij}} \leq 1 \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, m; \\ r=1, \dots, s; \\ j=1, \dots, n \end{array} \quad (2)$$

$$a_r \geq \varepsilon > 0 \quad r=1, \dots, s \quad (3)$$

$$b_i \geq \varepsilon > 0 \quad i=1, \dots, m \quad (4)$$

Modelde;

a_r : k karar birimi tarafından r. çıktıya verilen ağırlık,

b_i : k karar birimi tarafından i. girdiye verilen ağırlık,

Y_{rk} : k karar birimi tarafından üretilen r. çıktı,

X_{ik} : k karar birimi tarafından kullanılan i. girdi,

Y_{rj} : j. KVB tarafından üretilen r. çıktı,

X_{ij} : j. KVB tarafından kullanılan i. girdi,
 ϵ : Pozitif çok küçük bir değer,
 Max : En büyükleme olarak ifade edilir.

VZA'da n adet KVB için n adet model oluşturulur ve KVB'lerin her biri için görece etkinliğin bulunabilmesi için n tane en iyileme modelinin çözülmesi gerekir. Modellerin amaç fonksiyonu Eşitlik 1'de gösterilmiştir. Bu denklemde k tane karar verme birimi için toplam ağırlıklandırılmış sanal çıktıların, toplam ağırlıklandırılmış sanal girdilere oranının maksimize edilmesidir. Problemin çözümü içerisinde, her bir karar birimi kendi toplam faktör verimliliğini maksimum yapacak ağırlıkları belirler. Bu ağırlıklar Eşitlik 2'de gösterilmiş ve girdiler için $b_{1k}^*, b_{2k}^*, \dots, b_{mk}^*$, çıktılar için $a_{1k}^*, a_{2k}^*, \dots, a_{sk}^*$ şeklinde gösterilmiştir. Eşitlik 3 ve 4'te bu ağırlıkların pozitif küçük bir değerden daha büyük olması gerekliliği belirtilmiştir. Daha sonra bu ağırlık değerleri kullanılarak optimum etkinlik değeri olan θ^* elde edilir. Model KVB'lerin her biri için hesaplanan bu θ^* oranının 1 değerinin geçmediğini ve en büyük amaç fonksiyon değerinin 1 olabileceğini göstermektedir.

3.3. Karar Verme Birimlerin Seçimi

VZA, karar verme birimleri arasında aynı girdileri kullanarak benzer çıktılar üreterek etkinlik analizi yapabilmektedir. Ele alınan karar verme birimleri arasında performans farklılıkları vardır. Kullanılan KVB'ler aynı piyasa şartlarında, aynı amaçlarla aynı veya benzer işler yapmalıdır. KVB seçimlerinde ya da kararlarında iki şeye dikkat edilmelidir. Bunlardan birincisi KVB'ler kullandıkları kaynaklarla ürettikleri çıktılarından sorumlu olarak tanımlanmalıdır. Diğeri, kullanılan KVB sayısı etkinlik sonuçlarının anlamlı çıkabilmesi için yeterli sayıda olmalıdır.

KVB sayısı ile ilgili Norman kullanılan girdi ve çıktı sayısının çokluğuna göre en az 20 KVB'nin gerekliliğini belirtmiştir [32]. Bu çalışmada incelenen 24 KVB Adana üretim işletmelerinden

seçilmiş olup işletmeler kâr amacı güden ve benzer çıktılar üreten işletmelerdir.

3.4. Girdi ve Çıktıların Seçimi

Girdi ve çıktıların seçimi VZA'nın uygulanabilirliği açısından çok önemlidir. Yapılan çalışmada üretim işletmelerinin yeni endüstri devrimi teknolojileri veya uygulamaları ile ilgili çalışmalarının ne düzeyde oldukları tek çıktı olarak seçilmiş ve bununla ilgili işletmelerdeki yazılımsal, donanımsal ve süreçsel altyapılar girdi olarak seçilmiştir. Özellikle süreçleri belli olmayan, teknoloji/bilgi altyapısı yetersiz olan ve yeterli düzeyde donanıma sahip olmayan işletmelerin I4.0 çalışmaları yapması oldukça zordur. Çalışmada işletmelerin her biriminden dijitalleşme, kaynak ölçümü, kurum kültürü, teknoloji altyapısı vb. konuları ele alan 39 farklı girdi kullanılmıştır.

Modele çok fazla girdi veya çıktı eklendiğinde VZA'da etkin veya etkin olmayan birimlerin belirlenmesi zorlaşmaktadır. Aynı zamanda çalışma için veri toplamak zorlaşmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı çalışmada girdi ve çıktı sayıları belirlenirken eşitlik (5) dikkate alınmıştır. Kullanılan bu eşitlik ile girdi ve çıktı sayısının artırılması KVB sayısına bağlanmıştır.

$$N > (m+s)/2 \quad (5)$$

N: KVB sayısı, m: Girdi sayısı, s: Çıktı sayısı

Çizelge 1'de kullanılan 39 farklı girdi ve 1 çıktı gösterilmektedir. Belirlenen girdiler Adana bölgesinde faaliyet gösteren 24 firmadan elde edilmiştir. Bu girdiler, işletmelerin tüm fonksiyonlarından çalışma amacına yönelik verilerden oluşmaktadır. Dijital dönüşüm süreci boyunca işletmelerin I4.0 teknoloji ve uygulamalarına ne kadar uyum sağladıklarının öğrenilmesi amacıyla Kurumsal Kaynak Planlaması (KKP) süreçleri, kalite, teknoloji altyapısı ve insan kaynağı konuları özellikle ele alınmıştır. Bu konuların değerlendirilmesi için Likert ölçeği ile 1 ile 5 arasındaki puanlarla değerlendirme yapılmıştır. Seçilen bu girdilerin sonucunda tek bir çıktı olan vizyonel I4.0 çalışma düzeyleri belirlenmeye çalışmıştır.

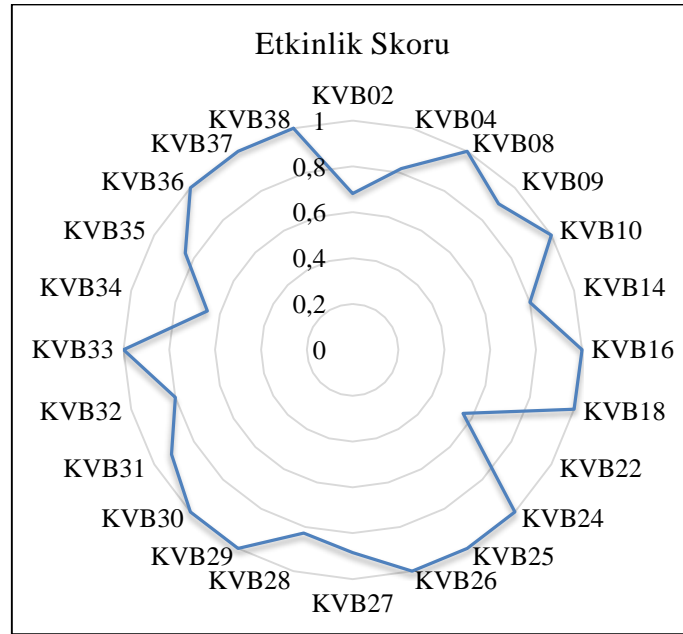
Çizelge 1. Çalışmada kullanılan girdi ve çıktılar

INPT1	Ar-Ge kaynağı
INPT2	Ar-Ge çalışan sayısı
INPT3	İnovasyon becerisi
INPT4	Teknolojik altyapı
INPT5	Finansal araçlarla iletişim
INPT6	Envanterin İzlenebilirliği
INPT7	KKP raporlama
INPT8	Bilgi güvenliği
INPT9	Müşteri İlişkileri Yönetimi (MİY) kullanımı
INPT10	Bilgi Teknolojileri (BT) güncelliği
INPT11	KKP finansal modüllerini kullanabilme
INPT12	KKP muhasebe modüllerini kullanabilme
INPT13	KKP satış ve satın alma modüllerini kullanabilme
INPT14	KKP üretim planlama modülü kullanabilme
INPT15	KKP operasyonlar yönetimi modüllerini kullanabilme
INPT16	İnternet altyapısı
INPT17	Tedarik zinciri yönetimi yazılımı kullanımı
INPT18	Barkod sistemi kullanımı
INPT19	Sipariş sistem verimliliği
INPT20	Kurum web sayfası kullanımı
INPT21	Sürekli eğitim
INPT22	Süreç iyileştirme
INPT23	KKP malzeme yönetim modüllerini kullanabilme
INPT24	Malzeme ihtiyaç planlaması çalışmaları
INPT25	Dijital belge yönetim sistemleri
INPT26	Donanım altyapısı yeterliliği
INPT27	Tedarik zinciri yönetimi
INPT28	Yalın üretim düzeyi

INPT29	Satın alma ve üretim iletişimi
INPT30	Kariyer yönetim sistemi
INPT31	Tedarik zinciri optimizasyonu çalışmaları
INPT32	Verimlilik izleme
INPT33	Makine verimliliği ölçülebilirlik düzeyi
INPT34	Teknolojiye yapılan yatırım düzeyi
INPT35	İş süreçlerinin analiz çalışmaları
INPT36	Eğitim planlaması
INPT37	Kurum teknoloji gelişiminin takip edilmesi
INPT38	Kariyer yönetim sistemi
INPT39	Performans yönetim sistemi
OUTPT1	Vizyonel Endüstri 4.0 çalışma düzeyi

4. BULGULAR

Çalışmada incelenen işletmelerin birbirine göre göreceli etkinlikleri VZA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. VZA yöntemi bir paket programı olan MaxDEA 8 programı yardımıyla uygulanmıştır. Kullanılan girdi ve çıktılar tüm işletmelerde elde edilebilen, ölçülebilen ve karşılaştırılabilen verilerden oluşmuştur. Yapılan analizlerin sonucu Şekil 1'de gösterilmiş ve yapılan incelemeler sonucu KVB22 0.556 ile etkinlik değeri en düşük olan işletme olurken birden fazla işletme için etkinlik değerinin üst sınırı olan 1 değeri elde edilmiştir.

**Şekil 1.** KVB'lere ait etkinlik skorları

Çizelge 2’de KVB’lere ait performanslar ve sıralamalar verilmiştir. Buna göre 24 işletmenin 13 tanesi görece etkin değerlere sahipken 11 işletme ise görece etkin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 2. KVB’lerin performans ve sıraları

Karar verme birimi	Performans	Sıra
KVB02	Etkin değil	22
KVB04	Etkin değil	19
KVB08	Etkin	1
KVB09	Etkin değil	15
KVB10	Etkin	1
KVB14	Etkin değil	20
KVB16	Etkin	1
KVB18	Etkin	1
KVB22	Etkin değil	24
KVB24	Etkin	1
KVB25	Etkin	1
KVB26	Etkin	1
KVB27	Etkin değil	16
KVB28	Etkin değil	18
KVB29	Etkin	1
KVB30	Etkin	1
KVB31	Etkin değil	14
KVB32	Etkin değil	21
KVB33	Etkin	1
KVB34	Etkin değil	23
KVB35	Etkin değil	17
KVB36	Etkin	1
KVB37	Etkin	1
KVB38	Etkin	1

İşletmelerin birbirine göre göreceli olarak elde edilen etkinlik değerleri incelendiğinde etkin olarak elde edilen 13 işletmenin girdi ve çıktı değerlerinin ortalaması işletmeler arasındaki kıyaslama için fikir oluşturmaktadır. Bu ortalama değerlerinin büyük bir çoğunluğuna göre üstünlük sağlayan işletmeler analiz sonucunda etkin olarak bulunmuştur. Çizelge 3’te görülen ortalamalar etkin olan işletmelere ait girdi ve çıktı ortalamalarını göstermektedir. Buna göre bir işletmenin etkin olabilmesi için envanter izlenebilirliği, dijital belge yönetim sistemleri ve vizyonel I4.0 çalışmaya düzeylerinin yaklaşık puanı 4’ten fazla olmalıdır. Ancak bu ortalamaların yalnız birine veya birkaçına bakarak işletmelerin etkinliklerini değerlendirmek her zaman doğru sonuçları vermeyecektir. Genel bir çerçevede bir işletme etkinlik değerini artırmak için bu puanları

baz alarak geliştirmesi gereken noktaları saptayabilir.

Çizelge 3. Etkin KVB’lerin girdi ve çıktı ortalamaları

Girdi/Çıktı	Etkin işletmelerin toplam değerlendirme puanları	Etkin işletme sayısı	Ortalama etkinlik değeri
INPT1	30	13	2,308
INPT2	26	13	2,000
INPT3	41	13	3,154
INPT4	45	13	3,462
INPT5	46	13	3,538
INPT6	53	13	4,077
INPT7	32	13	2,462
INPT8	40	13	3,077
INPT9	21	13	1,615
INPT10	40	13	3,077
INPT11	28	13	2,154
INPT12	39	13	3,000
INPT13	29	13	2,231
INPT14	30	13	2,308
INPT15	32	13	2,462
INPT16	45	13	3,462
INPT17	17	13	1,308
INPT18	41	13	3,154
INPT19	50	13	3,846
INPT20	38	13	2,923
INPT21	45	13	3,462
INPT22	43	13	3,308
INPT23	37	13	2,846
INPT24	37	13	2,846
INPT25	55	13	4,231
INPT26	48	13	3,692
INPT27	45	13	3,462
INPT28	37	13	2,846
INPT29	54	13	4,154
INPT30	46	13	3,538
INPT31	45	13	3,462
INPT32	51	13	3,923
INPT33	47	13	3,615
INPT34	46	13	3,538
INPT35	50	13	3,846
INPT36	42	13	3,231
INPT37	29	13	2,231
INPT38	47	13	3,615
INPT39	31	13	2,385
OUTPT1	53	13	4,077

İşletmelerin ortalama etkinlik değerleri incelendiğinde 0,903 gibi 1'e yakın olan bir değer olduğu görülmektedir. İşletmelerin etkinlik değerleri arasında değişim ise 0,13 gibi çok fazla değişken olmayan bir değerdir. Çizelge 4'te görüldüğü gibi etkin olmayan işletmeler kendi aralarında incelendiğinde değişkenliğin yine az olduğu görülebilmektedir. Bu sonuçlar, işletmeler arasında çok fazla bir etkinlik farkı olmadığını ortaya koymaktadır. Ancak KVB22 (0,566), KVB34 (0,656), KVB02 (0,681) gibi işletmelerin değişkenliğin çok olmadığı bu işletmeler arasında etkinlik değerinin oldukça düşük olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. KVB'lerin etkinlik istatistikleri

Toplam işletme sayısı	24
Etkin işletme sayısı	13
Ortalama etkinlik skoru	0,903
En düşük etkinlik	0,556
En düşük etkinliğe sahip işletme	KVB22
Tüm işletmelerin std. sapması	0,130
Etkin olmayan işletmelerin etkinlik ortalaması	0,789
Etkin olmayan işletmelerin std. sapması	0,112

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüz işletmeleri ileri teknoloji, hızlı üretim ve teslimat, kaliteli ürün, satış sonrası hizmet imkanları gibi çeşitli niteliklere sahip olmak zorundadır. Yeni endüstri devrimi ile bu niteliklerin yeterli olmayacağı kitlesel ve sipariş dayalı üretimin kişiye özel üretime dönmesi beklenmektedir. Bütün bu beklentiler imalat işletmelerini yeni endüstri devrimine geçişe zorlamaktadır. Ancak yeni endüstri devriminin geçişi ileri teknoloji, dijital süreçler, yeterli donanım ve yazılım alt yapısı vb. birçok ön şartın gerçekleşmesini de zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada bir imalat işletmesinin I4.0 entegrasyonunun değerlendirilmesi için 24 işletmeye 40 sorunun yöneltilmesiyle elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu verilerin değerlendirilmesinde VZA yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan verilerin 39'u girdi değişkeni olarak

seçilmiş ve sonucunda bir tane çıktı değişkeni incelenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda 24 işletmenin 13 tanesi etkin çıkarken 11 tanesi ise etkin olarak bulunmamıştır. Yapılan analiz sonucunda her girdi ve çıktı için ortalama etkinlik değeri hesaplanmış ve etkin olmayan işletmeler için bir hedef değer oluşturulmuştur. Ortalama etkinlik skoruna bakıldığında 0,903'lük yüksek bir değer elde edilmiş ancak en düşük etkinlik değeri 0,556 olarak bulunmuştur. Ayrıca tüm işletmeler ve etkin olmayan işletmeler ayrı ayrı incelenerek değişkenliği incelenmiştir. Buna göre her iki grubun da değişkenliği çok fazla olmamakla beraber etkin olmayan işletmelerin değişkenliği daha azdır. Bu durum, işletmeler arasındaki etkinlik skor farkının çok fazla olmadığı anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmanın, incelenen işletmeler bazında I4.0 geçişi için değerlendirmelerde bulunması ve etkinlik değerleri ile bu işletmelerin odaklanması gereken yerleri işaret etmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında çalışmada I4.0 için gerekli teknolojiler ve işletme içerisinde bu teknolojilere entegrasyonu sağlamak için gerekli olan girdilerin belirlenmesi çalışmayı önemli kılan bir başka noktadır.

Gelecek çalışmalar için farklı değerlendirme kriterlerinin ele alınması mümkündür. Çalışma daha farklı firmalarla yapılabilir ve gelişmelerin izlenmesi için bir Endüstri 4.0 entegrasyonu ölçeği oluşturularak zaman içerisindeki değişimlerin ele alınacağı bir sistem oluşturulabilir. Son olarak farklı karar verme yaklaşımlarının entegrasyonu ve bulanık mantık gibi yaklaşımlar da denenebilir. VZA ile işletmeler arasında bir etkinlik sıralaması kısmen yapılabilmektedir. Etkin olmayan işletmelerin etkinlik skorları kullanılarak bir sıralama yapılabilirken etkin olan işletmelerin tamamının değeri 1 olduğu için sıralanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle farklı yaklaşımlar ve çok kriterli karar verme yöntemleri işletmeler arasında bir sıra yapılmasına imkan verebilir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu makalede yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması oluşturacak durum gözlenmemiştir. Bundan dolayı çıkar çatışması bölümüne yer verilmemiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A., 2015. A Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
2. Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F., 2019. Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
3. Wan, J., Tang, S., Li, D., Wang, S., Liu, C., Abbas, H., Vasilakos, A.V., 2017. A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(4), 2039-2047.
4. McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J.L., Wong, C., Ashton, K., 2003. Auto ID Systems and Intelligent Manufacturing Control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 365-376.
5. Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E., Newman, S.T., 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
6. Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
7. Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W., 2016. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
8. Khan, A., Turowski, K., 2016. A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0. In *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"* (IITI'16), Springer, Cham, 15-26.
9. Crnjac, M., Veža, I., Banduka, N., 2017. From Concept to the Introduction of Industry 4.0. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(1), 21-30.
10. Strandhagen, J.W., Alfnes, E., Strandhagen, J.O., Vallandingham, L.R., 2017. The Fit of Industry 4.0 Applications in Manufacturing Logistics: A Multiple Case Study. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 344-358.
11. Siew, L.W., Fai, L.K., Hoe, L.W., 2018. An Optimal Control on the Efficiency of Technology Companies in Malaysia with Data Envelopment Analysis Model. *Journal of Telecommunication. Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 10(1), 107-111.
12. Fazlollahi, A., Franke, U., 2018. Measuring the Impact of Enterprise Integration on Firm Performance Using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Production Economics*, 200, 119-129.
13. Ghobakhloo, M., 2018. The Future of Manufacturing Industry: A Strategic Roadmap Toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
14. Machado, C.G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., Hallin, M., 2019. Industry 4.0 Readiness in Manufacturing Companies: Challenges and Enablers Towards Increased Digitalization. *Procedia Cirp*, 81, 1113-1118.
15. Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., Oliveira, T., 2019. Assessing Industry 4.0 Readiness in Manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry*, 107, 22-32.
16. Dalmarco, G., Ramalho, F.R., Barros, A.C., Soares, A.L., 2019. Providing Industry 4.0 Technologies: The Case of a Production Technology Cluster. *The Journal of High Technology Management Research*, 30(2), 100355.
17. Szalavetz, A., 2019. Industry 4.0 and Capability Development in Manufacturing Subsidiaries. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 384-395.
18. Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., Pellerin, R., 2020. Impacts of Industry 4.0 Technologies on

- Lean Principles. International Journal of Production Research, 58(6), 1644-1661.
19. Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M., 2020. The Applications of Industry 4.0 Technologies in Manufacturing Context: A Systematic Literature Review. International Journal of Production Research, 1-33.
20. Machado, C.G., Winroth, M.P., Ribeiro da Silva, E.H.D., 2020. Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: an Emerging Research Agenda. International Journal of Production Research, 58(5), 1462-1484.
21. Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., Nassimbeni, G., 2020. The Future of Manufacturing: a Delphi-based Scenario Analysis on Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change, 157, 120092.
22. Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A.B.L., Rajak, S., 2020. Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-country Comparative Perspective. International Journal of Production Economics, 224, 107546.
23. Bag, S., Gupta, S., Kumar, S., 2021. Industry 4.0 Adoption and 10R Advance Manufacturing Capabilities for Sustainable Development. International Journal of Production Economics, 231, 107844.
24. Eken, M.H., Kale, S., 2011. Measuring Bank Branch Performance Using Data Envelopment Analysis: The Case of Turkish Bank Branches. African Journal of Business Management, 5(3), 889-901.
25. Banker, R.D., 1992. Estimation of Returns to Scale Using Data Envelopment Analysis. European Journal of Operational Research, Vol. 62.
26. Timor, M., 2001. Yöneylem Araştırması ve İşletmecilik Uygulamaları. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Yayınları, İstanbul.
27. Dinçer, E., 2008. Veri Zarflama Analizi'nde Malmquist Endeksiyle Toplam Faktör Verimliliği Değişiminin İncelenmesi ve İMKB Üzerine Bir Uygulama. Marmara Üniversitesi İİBF Dergisi, 15(2), 825-846.
28. Kaya, Y., Doğan E., 2005. Dezenflasyon Sürecinde Türk Bankacılık Sektöründe Etkinliğin Gelişimi. BDDK, ARD Çalışma Raporları.
29. Aslankaraoğlu, N., 2006. Veri Zarflama Analizi ve Temel Bileşenler Analizi ile AB Ülkelerinin Sıralaması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 142.
30. Çavmak, Ş., 2017. Sağlık Hizmetlerinde Veri Zarflama Analizi ve Modelleri. Sağlık Yönetimi Dergisi, 1(1), 35-47.
31. Özden, Ü., 2008. Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Türkiye'deki Vakıf Üniversitelerinin Etkinliğinin Ölçülmesi. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37(2), 167-185.
32. Norman, M., Stoker, B., 1991. Data Envelopment Analysis: The Assessment of Performance, John Wiley & Sons, Inc.

Dört Noktalı Eğme Testi Altında Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bindirme Bağlantısının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi

Salih AKPINAR¹, Ahmet ÇALIK^{*2}

¹Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum

²Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 16.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların kullanımı otomotiv ve havacılık sektörlerinde oldukça yaygındır. Korozyona dayanıklılığı, titreşim absorbe yeteneği ve düşük kütleye sahip olması yapıştırıcıların bağlantılarda sıkça tercih edilmelerinin başlıca nedenleri olarak sıralanabilir. Bu çalışmada, yapıştırılarak bağlanan bindirme bağlantılar üzerinde dört noktalı eğme testi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada bindirme uzunluğu ve yapışkan kalınlığı sabit 5 farklı geometrideki numunelere 9 farklı konumda bükme yüklemesi uygulanmıştır. Deneysel çalışmadan kullanılan numunelerin sonlu eleman modelleri ANSYS yazılımında aynı yükleme şartlarında analiz edilmiş ve soyulma ve kesme gerilmeleri bindirme uzunluğu boyunca elde edilmiş ve deneysel sonuçlar sonlu elemanlar sonuçları ile doğrulanmıştır. Mevcut çalışma gösteriyor ki yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda bükme yükünün konumu test sonuçlarına belli oradan etki etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dört noktalı eğme, Yapıştırma, Bindirme bağlantı, Sonlu elemanlar

Experimental and Finite Element Analysis of Adhesive Bonded Lap Joint Subjected to Four-Point Bending Test

Abstract

The use of adhesive bonded joints is very common in the automotive and aerospace industries. Corrosion resistance, vibration absorbing ability and low mass can be listed as the main reasons why adhesives are frequently preferred in connections. In this study, the four-point bending test on glued lap joints was investigated experimentally and numerically. In the experimental study, bending loading was applied to the specimens in 5 different geometries with fixed overlap length and adhesive thickness at 9 different positions. The finite element models of the samples used in the experimental study were analyzed in the ANSYS software under the same loading conditions and the peeling and shear stresses were obtained along the overlap length and the experimental results were verified with the finite element results. The present study shows that the position of the bending load in adhesively bonded joints has a certain effect on test results.

Keywords: Four-point bend, Adhesive, Lap joint, Finite elements

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet ÇALIK, ac@mersin.edu.tr

1. GİRİŞ

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar cıvatalı ve perçinli bağlantılar gibi diğer geleneksel mekanik birleştirme sistemlerine göre montaj avantajlarından dolayı birçok tasarımcı tarafından tercih edilmektedir [1,2]. Yapıştırıcı teknolojisi üzerine yapılan iyileştirmelere paralel olarak Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisindeki uygulama alanı her geçen gün daha da artmaktadır [3,4]. Yapıştırıcı bağlantıların bu popülerliği tasarımcıların ve bilim adamlarının dikkatini daha da çok çekmekte ve yapıştırıcı bağlantılar üzerine yapılan çalışmalara hızla artan bir ilgi sağlayarak bu konudaki çalışmaların güncelliğini korumaktadır.

Yapıştırma bağlantılarda büyük gerilme konsantrasyonunu azaltmak için pek çok yöntem araştırılmaya devam etmektedir. Kademeli bindirme [5], uç doldurma [6], uç dalgalı [7], nano partikül takviyesi [8], köşe yuvarlama [9] ve çift yapışkanların [10] uygulamaları bu yöntemlerin örnekleridir. Gerilme konsantrasyonlarını yaygın olarak inceleyen testler; çekme, kayma, soyulma, kırılma tokluğu ve ayrılma testleridir. Literatürde dört nokta ve üç nokta eğilme testlerine ilişkin çalışmalar yer almaktadır.

Temiz [11] yaptığı çalışmada eğilme momentine maruz kalan çift bantlı bağlantılarda bindirme uzunluğu boyunca farklı rijitliklere sahip iki yapıştırıcının uygulanmasını ve kademeli rijitliğe sahip bağlantı hatlarının kullanılmasıyla bağlantı mukavemetinde olası kazanımlarını incelemiştir.

Eğilme momentine maruz kalan yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantı üzerindeki püskürme dolgusunun etkisi incelemek için çeşitli genişliklerdeki tek bindirmeli bağlantıların mekanik davranışları deneysel ve sayısal olarak Akpınar ve arkadaşları [12] tarafından incelenmiştir.

Aydın ve arkadaşları [13] yaptığı çalışmada yapıştırıcıların (FM 73 ve SBT 9244) performansını değerlendirmek için farklı bindirme uzunluklarına sahip derzler üzerinde dört noktadan

bükme deneyleri yapılmış ve bindirme bağlantıların kırılma yüzeyleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Bindirme bağlantılarda, yapıştırıcıların ve yapıştırılanların gerilme-gerinim davranışları (AA2024-T3) dikkate alınarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapıldıktan sonra, nümerik sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

Tran ve arkadaşları [14] parmak eklem direncini artırmak için, Dört noktalı eğme testlerinden elde edilen maksimum eğilme kuvvetini dikkate alıp tasarım değişkenleri olarak tanımladıkları uzunluğu, eğim ve uç boşluklarını Yanıt Yüzey Yöntemi ve Kriging interpolasyonu kullanılarak optimize etmişlerdir.

Akpınar, I. ve arkadaşları [15] yaptığı çalışmada; nano takviyeli yapışkanlı tek bindirmeli kompozit bağlantıların çekme ve dört nokta eğilme yükleri altındaki yüklerine, çekme ve eğilme momenti hasar mekanizmaları ve yer değiştirme yeteneği deneysel olarak belirlendi.

Bir başka çalışmada, epoksi yapıştırıcı Araldite 2015'e GNP-OH ve nano silika partiküllerinin eklenmesinin etkisi, alüminyumun dört noktadan bükülmeye maruz kalan kompozit bağlı bindirme bağlantılarına yorulma davranışı üzerinde incelenmiştir [16].

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantılar üzerinde dört noktalı eğme testi 9 farklı modelde deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yükleme noktalarının deney sonuçlarına ne tür etkiler yaptığı araştırılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki yükleme noktalarının konumları pek çok modelde sonuçları etkilemese de L1 uzunluğunun bindirme uzunluğunun yarısından az olduğu durumlarda L2 uzunluğunun önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

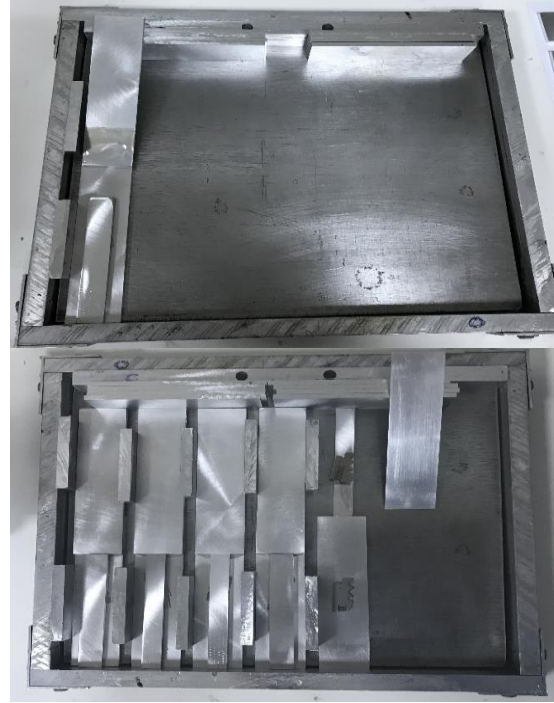
2.1 Malzeme ve Numuneler

Yapıştırılarak bağlanan tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri, 3.0 mm kalınlığında

alüminyum AA2024-T3 tabakalardan oluşmuştur. AA2024-T3 alüminyum alaşımı havacılık sektöründe yaygın kullanıma sahiptir. Alüminyum tabakaları yapıştırmak için iki parçalı bir epoksi yapıştırıcı, DP460 (3M™) kullanıldı. Epoksi ve hızlandırıcıdan oluşan çift bileşenli DP460 yapışkanı, deneylerde epoksi hızlandırıcının iki katı olacak şekilde karıştırılarak kullanılmıştır. DP460 yapıştırıcısı metallerin yanı sıra cam, seramik ve pek çok kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu yapıştırıcı dinamik yüklerle karşı yüksek direnç sağlar. Otomotiv ve denizcilik (gemi yapımında) sektörü gibi büyük boyutlu metal ve kompozit parçaların yapıştırılmasında düşük maliyetli bir bağlantı sağlaması başlıca avantajıdır.

Bağlantıda kullanılacak alüminyum levhalar 3 mm kalınlığında ve Çizelge 1’de boyutlarında hassas testere ile kesildi. İstenilen boyutlarda kesilen levha üzerindeki temizlik işlemleri için kaba zımpara (400’lük SiC) ile zımparalanmıştır. Hassa zımpara (1000’lük ZiC) ile kaba zımpara ile temizlenmiş numune üzerindeki kaba zımpara çizikleri yok edilmiştir. İki aşamalı zımpara işlemi neticesinde numunelerde temiz ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir. Pürüzsüz yüzeye sahip numuneler toz deterjan ile yıkanmış ve sonrasında asetonda 10-12 dakika bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 60°C sıcaklıkta bir etüv içerisinde kurutulmuşlardır.

Yüze hazırlama işlemi tamamlanmış numunelerin bindirme bölgelerine sıvı yapıştırıcı bir master yardımıyla yayılmıştır. Yapışkan kalınlığı 0,18 mm kalınlığında tüm yapışma bölgesince sabit kalabilmesi için bağlantının her iki ucuna 3,18 mm kalınlığında metal parçalar kullanılarak, sabitleme kalıplarının (Şekil 1) içerisine yerleştirilmiştir. Kalıp içerisindeki numuneler oda sıcaklığında 12 saat boyunca 70° C ve 0,15 MPa basınç ile kürlendi. Kürlenme sonrası numuneler 12 saat boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak tam kürlenme sağlanmıştır. Yapıştırılan numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra keski bir bıçak yardımıyla dışarı taşarak fazlalık oluşturan donmuş yapışkanlar temizlenmiştir. Böylece deneysel çalışmadan kullanılacak numuneler elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Yapıştırma bağlantı için sabitleme kalıbı



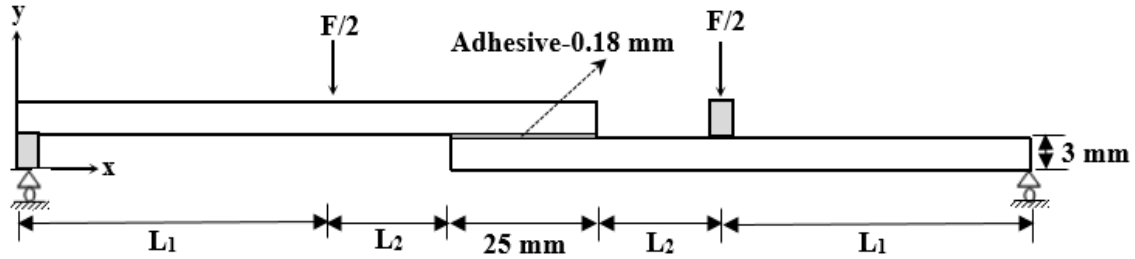
Şekil 2. Deneysel numuneler

2.2. Deneysel Prosedür

Bu çalışmada, farklı yükleme noktalarında eğme momentine maruz yapıştırma ile birleştirilmiş bindirme bağlantılarında maksimum yerdeğiştirme ve eğilme momenti kopma yükü incelenmiştir. Yapıştırılan levha üzerindeki yükleme noktalarının konumları (L_1 ve L_2 uzunlukları, Şekil 1) değiştirilirken sonuçları doğru bir şekilde karşılaştırmak için, bindirme uzunluğu, yapışkan ve levha kalınlığı sabit tutuldu. Bu örneklerin deneysel ve geometrik parametreleri Çizelge 1 ve Şekil 3'de verilmiştir.

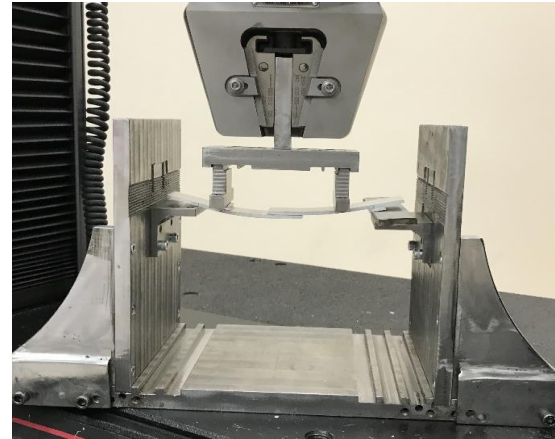
Çizelge 1. Dört nokta eğme testine maruz yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantının yükleme parametreleri

Yükleme Tipi	L_1 (mm)	L_2 (mm)
YT-1	30	10
YT-2	30	20
YT-3	30	30
YT-4	20	10
YT-5	20	20
YT-6	20	30
YT-7	10	10
YT-8	10	20
YT-9	10	30



Şekil 3. Dört nokta eğme testine maruz yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantının yükleme ve destek pozisyonları

Instron evrensel test makinesinde yapıştırılarak birleştirilen bağlantı numunelerinin eğilme davranışlarını belirlemek için dört noktalı eğme deneyleri yapıldı. Deney numuneleri iki sabit destek üzerine bindirildi, yük yapışma uzunluğunu merkezleyecek şekilde iki noktadan Şekil 3'de gösterildiği gibi uygulandı. Test cihazı çenelerinin kafa hızı, ASTM D 790-07 standardına göre 5 mm/dak idi. Üst üste bindirme bağlantıya sahip olmaları nedeniyle numunelerin sol ve sağ tarafları, test destekleri üzerinde yatay olarak konumlandırılmaz. Bunun üstesinden gelmek için, uygun kalınlığa sahip ek plakalar (destekler) test numunesinin sağ veya sol tarafının altına yerleştirildi. Ayrıca yükün uygulandığı noktalara yapışma yüzeyine momentin eşit dağılmasını sağlamak için yükün uygulandığı noktalara yatay konumlandırma olacak şekilde destek elemanları yerleştirilmiştir. Dört noktadan bükme test ekipmanı ve örnek yük konumlandırması Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Dört noktadan bükme test ekipmanı ve örnek yük konumlandırması

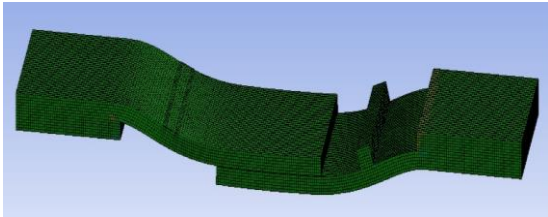
Tüm ortak numuneler için uygulanan yük aynı fakat yükün konumları farklıdır. Her bir test en az 3 kez tekrarlandı. Doğrulanmış sonuçlar kaydedilerek hasar yükleri Çizelgesi oluşturulmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 2. Numunelerin deneysel sonuçları

Yükleme Tipi	Moment ($F/2 * L_1$)	Experimental failure load, F_{EXP} (N)	Experimental failure moment, M_{EXP} (N.mm)	Displacement (mm)
YT-1	15F	1307	19600	7,39
YT-2	15F	1333	19995	7,75
YT-3	15F	1700	25500	10,52
YT-4	10F	2050	20500	3,70
YT-5	10F	2260	22600	5,75
YT-6	10F	2650	26500	7,20
YT-7	5F	5681	28405	2,69
YT-8	5F	6361	31805	5,08
YT-9	5F	4803	24015	3,75

2.3. Sonlu Elemanlar Analizi

Yapıştırıcının (DP460) mekanik özellikleri ve daha önce yayınlanan Akpınar [17]'in çalışmalarından alınmıştır. Analizde yapıştırıcının mekanik özellikleri; Elastisite modülü $72,400 \pm 530$ MPa, Poission oranı 0,33, σ_t : 482 ± 12 MPa, ϵ_t : 0,1587, yapıştırılan levhanın mekanik özellikleri ise Elastisite modülü 2077 ± 47 MPa, Poission oranı 0,38, σ_t (MPa) $44,6 \pm 1,2$, ϵ_t : 0,0428 olarak tanımlanmıştır. Yapılan sonlu eleman ağında eleman boyunu 0,05 mm'den küçük olarak seçilmiştir. Stres dağılımının kritik olduğu bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılmıştır (Şekil 5). Sınır şartları Şekil 3'de gösterildiği tanımlanmıştır. Yapışma yüzeyinde soyulma ve kesme gerilmesi değerleri rapor edilmiştir.



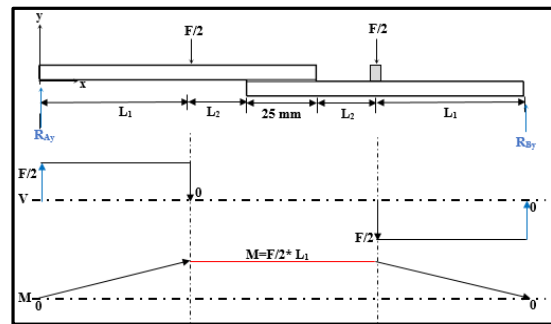
Şekil 5. Bir numuneye ait sonlu eleman ağ modeli

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri dokuz farklı dört nokta eğme testine maruz bırakılmış olup, her bir yüklemeye tipine ait maksimum hasar yükü ve bu hasar yüküne tekabül eden yer değiştirme sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 6'da verilen yapıştırma bağlantısında

oluşan moment eğrisi göz önüne alınarak her bir yüklemeye tipinde oluşan hasar moment değerleri elde edilmiştir (Çizelge 2).

L_1 uzunluğunu 30 mm'de sabit tutup (YT-1); L_2 uzunluğunu 10 mm'den 20 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %2, L_2 uzunluğunu 20 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %27 ve L_2 uzunluğunu 10 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %30 artmaktadır. Ayrıca, L_1 uzunluğunu 20 mm'de sabit tutup (YT-4); L_2 uzunluğunu 10 mm'den 20 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %10, L_2 uzunluğunu 20 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %17 ve L_2 uzunluğunu 10 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %29 artmaktadır.



Şekil 6. Dört nokta eğme testine maruz yapıştırma bağlantısında oluşan kesme kuvveti ve moment eğrileri

Diğer taraftan, L_1 uzunluğunu 10 mm'de sabit tutup (YT-7); L_2 uzunluğunu 10 mm'den

20 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %12 artarken, L_2 uzunluğunu 20 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %25 ve L_2 uzunluğunu 10 mm'den 30 mm'ye çıkardığımızda hasar yükü yaklaşık %16 azalmaktadır.

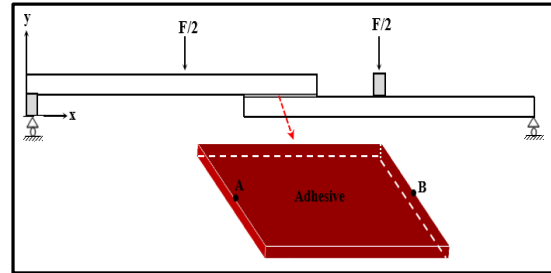
Burada elde edilen önemli sonuçlardan biri, YT-1, YT-2 ve YT-3 yükleme tiplerinin bindirme bölgesinde oluşan maksimum moment, L_1 'in sabit olmasından dolayı teorik olarak sabit 15F kadar olmaktadır. Ancak L_2 'nin değişmesi bağlantının hasar yükünün değiştirdiği ve buda maksimum moment değerini değiştirmektedir. Bunun nedeni L_2 'nin artırılması bağlantının eğilme rijitliğini azalttığı ve bu durum bağlantı üzerine gelen yükü sönmüleme kapasitesini artırmaktadır. Bu durum sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak yapışma yüzeyinden elde edilen soyulma gerilme grafikleri ile oldukça uyumludur (Şekil 8).

L_2 uzunluğunu 10 mm'de sabit tutup L_1 uzunluğunu 30 mm'den 20 mm'ye indirdiğimizde, bağlantının hasar yükü yaklaşık %57, L_1 uzunluğunu 20 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde bağlantının hasar yükü yaklaşık %177 ve L_1 uzunluğunu 30 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde ise bağlantının hasar yükü yaklaşık %335 artmaktadır. L_1 uzunluğunun azaltılması bağlantının bindirme bölgesinde oluşan maksimum momenti sırasıyla 15F, 10F ve 5F'e kadar düşürmekte ve bu durum bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Ancak buradan elde edilen önemli sonuçlardan biri, L_1 uzunluğuna bağlı olarak bağlantıda oluşan teorik moment deki azalma oranına göre bağlantının hasar yükündeki artış oranı teorik olarak beklenenden daha fazla olmaktadır. Bu durum uzunluğa bağlı olarak bağlantıda oluşan eğilme rijitliği ile ilişkilidir.

Ayrıca, L_2 uzunluğunu 20 mm'de sabit tutup L_1 uzunluğunu 30 mm'den 20 mm'ye indirdiğimizde, bağlantının hasar yükü yaklaşık %70, L_1 uzunluğunu 20 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde bağlantının hasar yükü yaklaşık %181 ve L_1 uzunluğunu 30 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde bağlantının hasar yükü yaklaşık %377 artmaktadır. Diğer taraftan L_2 uzunluğunu 20 mm'de sabit tutup L_1 uzunluğunu 30 mm'den 20 mm'ye

indirdiğimizde, bağlantının hasar yükü yaklaşık %56, L_1 uzunluğunu 20 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde bağlantının hasar yükü yaklaşık %81 ve L_1 uzunluğunu 30 mm'den 10 mm'ye indirdiğimizde bağlantının hasar yükü yaklaşık %183 artıyor. Bu deneysel verilerden elde edilen önemli sonuçlardan bir diğeri ise, dört nokta eğme yüküne maruz bağlantının hasar yükü açısından L_1 uzunluğuna göre L_2 uzunluğunun daha etkili olmasıdır. Ayrıca bağlantı hasar yükü açısından en iyi sonuç L_1 uzunluğunun 10 mm ve L_2 uzunluğunun 20 mm olan yükleme tipinden (YT-8) elde edilmiştir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek kademeli bindirme bağlantısında bindirme uzunluğunun ve malzeme kalınlığının yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilmeleri nasıl etkilediğini incelemek için, Şekil 7'de gösterilen yapıştırıcı tabakasının genişliğinin orta hattı olan A-B hattı boyunca gerilmeler elde edilmiştir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasara neden olan gerilmeler yapıştırıcı tabakasında oluşan soyulma (σ_y) ve kayma (τ_{xy}) gerilmeleri olduğundan, numerik analizde bu iki gerilme göz önüne alınmıştır. Gerilme dağılımları farklı yükleme tiplerine sahip tüm bağlantılarda 650 N'luk (deneysel olarak elde edilen en küçük hasar yükünün yaklaşık yarısı olan yük) eğme yükü altında incelenmiştir.

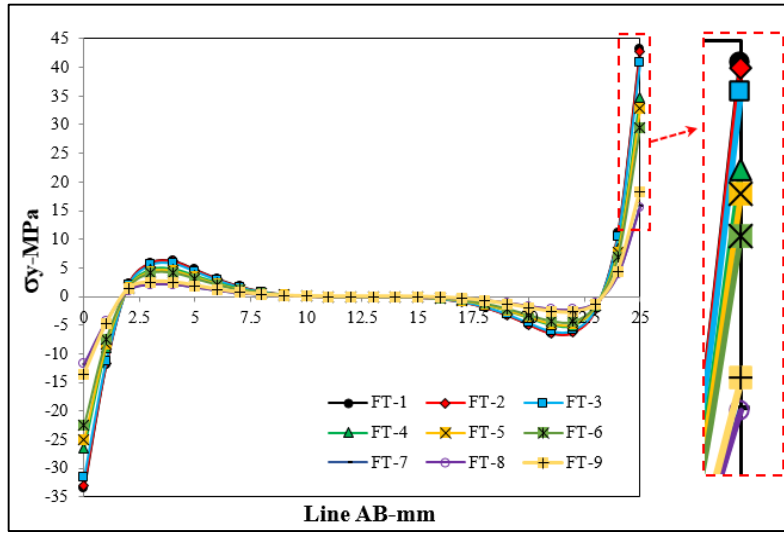


Şekil 7. Tek kademeli bindirme bağlantısının sonuçların alındığı A-B referans hattı

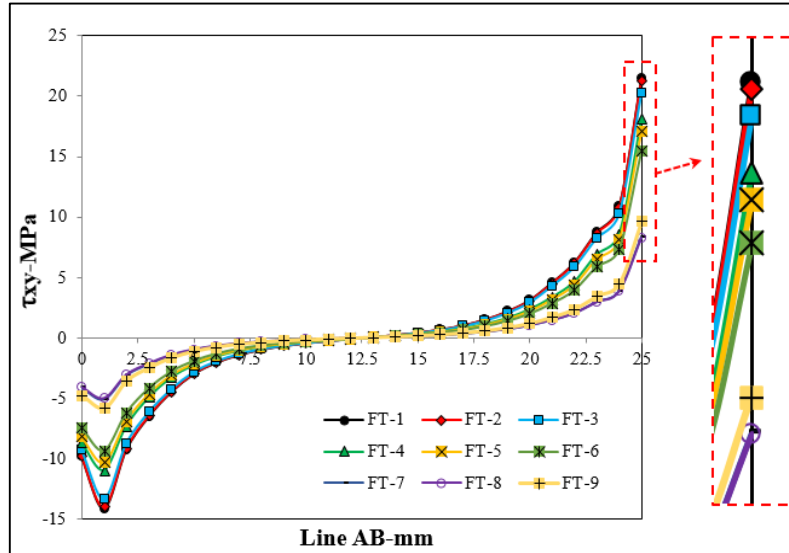
Şekil 8'da verilen farklı yükleme tiplerine sahip tek kademeli bindirme bağlantısının A-B hattı boyunca oluşan soyulma gerilme (σ_y) dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmelerinin yoğunlaştığı ve A noktasında bası karakterli B noktasında ise çeki

karakterli olduğu görülmektedir. Bu durum dört nokta eğme yüklemesinin sınır şartlarından kaynaklanmaktadır. Bindirme bölgesinin her iki ucundan merkeze doğru yaklaşık %20 kısımdan sonra soyulma gerilmeleri (merkeze yakın bölgelerde) yaklaşık sıfır olduğu anlaşılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarında L_1 ve L_2 uzunluklarına

bağlı olarak A ve B noktalarında oluşan soyulma gerilmeleri değiştirmektedir. Bindirme bölgesinin uçlarında oluşan bu soyulma gerilmelerinin azalması bağlantının hasar yükünü artmasına neden olacağı varsayımı göz önüne alındığında, deneysel veriler ile nümerik analiz verilerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı yüklem tiplerinde A-B hattı boyunca yapıştırıcı tabakasında oluşan soyulma gerilme (σ_y) dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 9. Farklı yüklem tiplerinde A-B hattı boyunca yapıştırıcı tabakasında oluşan kayma gerilme (τ_{xy}) dağılımlarının karşılaştırılması

Şekil 9’da verilen kayma gerilmeleri (τ_{xy}) incelendiğinde, bağlantıda L_1 uzunluğunun sabit L_2 uzunluğunun artmasıyla bindirme bölgesinin B uçuşunda oluşan gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca bindirme bölgesinin uçlarında oluşan hem soyulma hem de kayma gerilme değerindeki azalma en fazla YT-8 olan yükleme tipinde olduğu ve deneylerden elde edilen hasar yükünün en fazla bu yükleme tipinde olması, deneysel ve nümerik analizlerin uyumu açısından önemli bir sonuçtur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

L_2 ’nin artırılması bağlantının eğilme rijitliğini azalttığı ve bu durum bağlantı üzerine gelen yükü sönümleme kapasitesini artırmaktadır.

L_1 uzunluğuna bağlı olarak bağlantıda oluşan teorik moment deki azalma oranına göre bağlantının hasar yükündeki artış oranı teorik olarak beklenenden daha fazla olmaktadır. Bu durum uzunluğa bağlı olarak bağlantıda oluşan eğilme rijitliği ile ilişkilidir.

Dört nokta eğme yüküne maruz bağlantının hasar yükü açısından L_1 uzunluğuna göre L_2 uzunluğunun daha etkili olmasıdır.

Bağlantı hasar yükü açısından en iyi sonuç L_1 uzunluğunun 10 mm ve L_2 uzunluğunun 20 mm olan yükleme tipinden (YT-8) elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada deneysel veriler ile nümerik analiz verilerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. da Silva, L.F.M., Campilho, R.D.S.G., 2012. Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 1–93.
2. Çalık, A., Akpınar, S., 2019. Effect of Extensometer Usage on Obtaining the Force-

- Displacement Curve of the Adhesively Single Lap Joint. European Mechanical Science, 3(4), 142–6. doi: 10.26701/ems.646610.
3. Filipe, L., N.D., 2008. Modeling of Adhesively Bonded Joints. 1st Ed. Editors: da Silva, Lucas F. M. (Ed.) Springer, 335. Doi: 10.1007/978-3-540-79056-3.
4. Bayramoglu, S., Akpınar, S., Çalık, A., 2021. Numerical Analysis of Elasto-plastic Adhesively Single Step Lap Joints with Cohesive Zone Models and its Experimental Verification. Journal of Mechanical Science and Technology, 35(2), 641–9. doi: 10.1007/s12206-021-0124-0.
5. Bayramoglu, S., Demir, K., Akpınar, S., 2020. Investigation of Internal Step and Metal Part Reinforcement on Joint Strength in the Adhesively Bonded Joint: Experimental and Numerical Analysis. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 108, 102613. doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102613.
6. Tsai, M.Y., Morton, J., 1995. The Effect of a Spew Fillet on Adhesive Stress Distributions in Laminated Composite Single-lap Joints. Composite Structures, 32(1-4), 123-31. doi: 10.1016/0263-8223(95)00059-3.
7. Solmaz, M.Y., Yıldırım, S., 2018. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Dalgalı Bağlantı (Wavy-lap) Performanslarının Uç Açısına Bağlı Olarak Araştırılması. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 30(1), 287–94.
8. Akpınar, S., 2016. Alüminyum Oksit ve Titanyum Dioksit Partikül Takviyeli Yapıştırıcılarla Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2), 244–52. doi: 10.28948/ngumuh.295635.
9. Çalık, A., 2016. Effect of Adherend Shape on Stress Concentration Reduction of Adhesively Bonded Single Lap Joint. Engineering Review, 36(1), 29-34.
10. Afkar, A., Camari, M.N., 2014. Finite Element Analysis of Mono-and Bi-Adhesively Bonded Functionally Graded Adherend. Journal of Failure Analysis and Prevention, 14(2), 253–8. doi: 10.1007/s11668-014-9790-x.
11. Temiz, Ş., 2006. Application of Bi-adhesive in Double-strap Joints Subjected to Bending

- Moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(14), 1547-60. doi: 10.1163/156856106778884262.
12. Akpınar, S., Doru, M.O., Özel, A., Aydın, M.D., Jahanpasand, H.G., 2013. The Effect of the Spew Fillet on an Adhesively Bonded Single-lap Joint Subjected to Bending Moment. *Composites Part B: Engineering*, 55, 55–64. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.05.056.
 13. Demir Aydın, M., Özel, A., Temiz, Ş., 2004. Non-linear Stress and Failure Analyses of Adhesively-bonded Joints Subjected to a Bending Moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(14), 1589-602. doi: 10.1163/1568561042411286.
 14. Tran, V.D., Oudjene, M., Méausoone, P.J., 2014. FE Analysis and Geometrical Optimization of Timber Beech Finger-joint Under Bending Test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 52, 40-7. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007.
 15. Akpınar, I.A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H., Ozel, A., 2017. Research on Strength of Nanocomposite Adhesively Bonded Composite Joints. *Composites Part B: Engineering*, 126, 143–52. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.06.016.
 16. Zamani, P., Jaamialahmadi, A., da Silva, L.F.M., 2021. The Influence of GNP and Nano-silica Additives on Fatigue Life and Crack Initiation Phase of Al-GFRP Bonded Lap Joints Subjected to Four-point Bending. *Composites Part B: Engineering*, 207 (September 2020): 108589. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108589.
 17. Gavgali, E., Sahin, R., Akpınar, S., 2021. An Investigation of the Fatigue Performance of Adhesively Bonded Step-lap Joints: An Experimental and Numerical Analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104(June 2020): 102736. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102736.

Dikkat Modülleri ile Oluşturulmuş Derin Öğrenme Modelini Kullanarak Pamuk Hastalığının Tespiti

Mesut TOĞAÇAR*¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri
Bölümü, Elazığ

Geliş tarihi: 31.03.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Pamuk, dünya genelinde önemli bir endüstri sektörü olup, tarıma dayalı ülkelerde ekonomik kalkınmanın en önemli faktörlerinden biridir. Ülkemiz, pamuk tarımına elverişli ülkeler arasında yer almaktadır ve genelde Akdeniz ile Güneydoğu Anadolu bölgesinde pamuk üretimi gerçekleştirilmektedir. Pamuk bitkisinden iç ve dış etmenlerden kaynaklı birçok hastalık görülebilmektedir. Araştırmacılar, pamuk hastalığının tespitini gerçekleştirmek ve verimli bir üretim elde edebilmek için son zamanlarda yapay zekâ tabanlı çalışmalara odaklanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan veri kümesi; hastalıklı pamuk yaprağı, hastalıklı pamuk bitkisi, sağlam pamuk yaprağı ve sağlam pamuk bitki görüntülerinden oluşmaktadır. Önerilen yaklaşımda, veri büyütme tekniği ile dikkat modüllerinden oluşan derin öğrenme modeli birlikte kullanılmıştır. Çalışmanın analizlerinde, Olasılıksal Dereceli Azalma (ODA) ve Uyarlanabilir Moment Tahmini (UMT) optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Sınıflandırma sürecinde elde edilen en iyi genel doğruluk başarısı %96,56 olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, Dikkat modülleri, Pamuk hastalığı, Veri büyütme

Detection of Cotton Disease Using Deep Learning Model Created with Attention Modules

Abstract

Cotton is an important industrial sector worldwide and is one of the most important factors of economic development in countries based on agriculture. Our country is among the countries that are suitable for cotton agriculture and cotton production is generally carried out in the Mediterranean and Southeast Anatolia. Many diseases caused by internal and external factors can be seen in cotton plants. Researchers have recently focused on artificial intelligence-based studies to detect cotton disease and achieve efficient production. The dataset used in this study; it consists of diseased cotton leaf, diseased cotton plant, fresh cotton leaf and disease fresh plant images. In the proposed approach, the data augmentation technique and the deep learning model consisting of attention modules are used together. Stochastic Gradient Descent (SGD) and Adaptive Moment Estimation (ADAM) optimization methods were used in the analysis of the study. The best overall accuracy success achieved in the classification process was 96.56%.

Keywords: Deep learning, Attention modules, Cotton disease, Data augmentation

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mesut TOĞAÇAR, mtogacar@firat.edu.tr

1. GİRİŞ

Pamuk, tarıma dayalı tüm ülkelerinde ekonomik getirisi olan ve çeşitli sanayi kollarında işlev gören bitki türüdür. Dünya genelinde pamuk üretiminin en çok gerçekleştiği ülkeler arasında; Hindistan, Çin, ABD gelmektedir [1]. Türkiye'de pamuk üretiminde dünyada sayılı ülkeler arasında yer almaktadır. Ülkemizin Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde pamuk yetiştiriciliği yoğun bir şekilde gerçekleştirilmektedir [2]. Şanlıurfa, Aydın, Hatay, Diyarbakır, Adana ve İzmir ön sıralarda yer alan şehirlerdir [3].

Pamuk bitkisinden elde edilen lifler ve yağlar sanayinin hammadde olarak kullanılmaktadır [4]. Ekonomik değeri yüksek olan bu bitkinin iklim şartlarına elverişli olarak yetiştirilmesi gerekir. Ülkemizde, sıcak ve sulama imkânı fazla olan bölgelerde pamuk yetiştirilmektedir [5]. Pamuk bitkisinde çevresel etmenlerden kaynaklı birçok hastalık meydana gelebilmektedir ve oluşan bu durum "pamuk hastalığı" olarak adlandırılmaktadır [6,7]. Pamuk hastalığının yaygınlaşması durumunda üretimdeki verim azalmakta ve ülke ekonomisine zarar verebilmektedir. Üreticiler tarafından pamuk hastalığının önüne geçebilmek için çeşitli önlemler alınmaktadır [8].

Araştırmacılar, ekonomik değeri yüksek olan pamuk bitkisinin verimini düşürmemek, sağlıklı bir şekilde kullanabilmek için teknolojik gelişmelere odaklanmış çalışmalar üzerinde durmaktadırlar. Son zamanlarda, pamuk hastalığının tespitinde yapay zekâ tabanlı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları incelenirse; Nikhil Shah ve arkadaşları [9], pamuk bitkisi görüntülerini kullanarak hastalıklı tür ve hastalıklı olmayan tür olmak üzere ikili bir sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. Onlar, görüntü verisine ön işlem adımlarını uygulamışlardır. Veri bölütleme, veri çoğaltma tekniklerini her bir görüntü için kullanmışlardır. Ardından, çok katmanlı yapay sinir ağı (YSA) modelini kullanarak sınıflandırma sürecini gerçekleştirmişlerdir. Onlar, analiz ölçümünde t-testini kullanmışlar ve elde ettikleri

ortalama bağıl hata oranı %5,1 tespit etmişlerdir. Nirmal Chowdhary ve arkadaşları [10], pamuk hastalığını tespiti için görüntü işleme ve makine öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. Onlar, her bir görüntü verisine ön işlem adımlarını "Uyarlanabilir histogram eşitleme (UHE)-Adaptive histogram equalization (AHE) ve k-ortalama bölütleme" uygulamışlardır.

Ardından makine öğrenme yöntemleri; destek vektör makineleri (DVM)-Support Vector Machines (SVM), en yakın komşu (EYK)-nearest neighbors (KNN) yöntemi ve YSA modeli ile sınıflandırmışlardır. En iyi sınıflandırma performansını YSA modeli ile elde etmişler ve %89 oranında bir başarı sağlamışlardır. Nimra Pechuho ve arkadaşları [11], pamuk hastalığının tespitinde derin öğrenme modelini kullanmışlardır. Onlar çalışmasında, Inception V3 modeli ile veri kümesini eğitmişler ve Softmax yöntemi ile modelin sınıflandırılmasını gerçekleştirmişlerdir. Sınıflandırma sürecinde elde ettikleri genel doğruluk başarıları %91 olarak gerçekleşmiştir. Mva Gulhane ve arkadaşları [12], pamuk hastalığının tespiti için ön işlem adımları ve makine öğrenme yöntemini kullanmışlardır. Onlar, ön işlem adımı olarak renkli görüntü bölütleme yöntemini uygulamışlardır. Sınıflandırma sürecini DVM yöntemi ile gerçekleştirmişler ve %90,5 oranında genel doğruluk başarıları elde etmişlerdir.

Bu makalenin amacı, pamuk hastalığının tespitini yapay zekâ tabanlı önerilen yaklaşımla başarılı bir şekilde gerçekleştirmektir. Bunun için görüntü kümesi ön işlem adımlarından geçirilerek dikkat modüllerinden oluşturulan evrimsel sinir ağı (ESA)-convolutional neural network (CNN) modeli eğitilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada diğer bölümler ise şu şekildedir; veri kümesi ile ilgili bilgiler 2. bölümde verilmiştir. Çalışmanın analizinde kullanılan yöntem ve model hakkında bilgiler 3. bölümde verilmiştir. Deneysel analizler ve sonuçları 4. bölümde yer almıştır. 5. ve 6. bölümler, sırasıyla Tartışma ve Sonuç bölümünden oluşmuştur.

2. VERİ KÜMESİ

Veri kümesi, pamuk yaprağı ve bitki görüntülerinden oluşmaktadır ve Kaggle web sitesinde erişime sunulmuştur. Veri kümesi, dört sınıftan oluşmaktadır; hastalıklı pamuk yaprağı, hastalıklı pamuk bitkisi, sağlam pamuk yaprağı ve sağlam pamuk bitkisi. Sınıf türlerine ait örnek görüntüler Şekil 1’de gösterilmiştir. Her bir görüntü verisi JPEG dosya uzantılı olup, 24 bit derinliğindedir ve görüntülerin çözünürlüğü sabit değildir. Veri kümesi, test ve eğitim kümesi olarak iki gruba ayrılmıştır. Eğitim veri kümesinde toplam 1951 imge yer almaktadır. Test veri kümesinde toplam 349 imge yer almaktadır [13]. Toplam 2300 görüntüden oluşan veri kümesinin istatistiksel bilgileri Çizelge 1’de verilmiştir. Sınıf tabanlı istatistiksel bilgiler ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

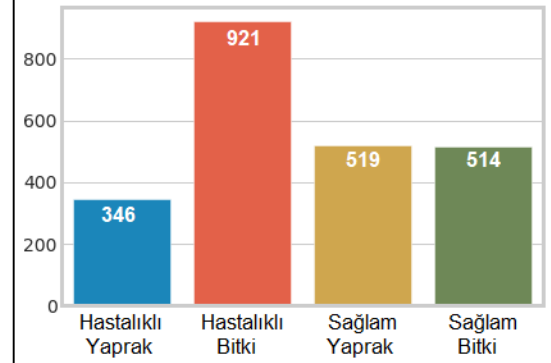


(a) (b) (c) (d)

Şekil 1. Pamuk veri kümesinin sınıf görüntüleri
a) hastalıklı yaprak, b) hastalıklı bitki,
c) sağlam yaprak, d) sağlam bitki

Çizelge 1. Eğitim ve test verilerinin istatistiksel bilgileri

Veri kümesi	Sınıf	Görüntü sayısı	Toplam
Eğitim	Hastalıklı yaprak	288	1951
	Hastalıklı bitki	815	
	Sağlam yaprak	427	
	Sağlam bitki	421	
Test	Hastalıklı yaprak	58	349
	Hastalıklı bitki	106	
	Sağlam yaprak	92	
	Sağlam bitki	93	



Şekil 2. Pamuk veri kümesinin sınıf bazlı istatistiksel bilgileri

3. TEKNİK VE YÖNTEMLER

3.1. Veri Büyütme Tekniği

Veri büyütme tekniği; görüntülerin farklı varyasyonlarını oluşturarak veri kümesindeki görüntü çeşitliliğini arttırmayı ve derin öğrenme modellerinin aşırı uyum (overfitting) probleminden kurtarmayı hedefler. Başka bir deyişle; model küçük kapasiteli veri setleri ile eğitilirken ortaya çıkan ezberleme probleminden kurtarmaya çalışır. Böylece daha genel bir modelin eğitilmesi amaçlanır. Veri büyütme tekniğinde; çevirme, kesme, kaydırma, yakınlaştırma, doldurma gibi parametreler yer almaktadır [14]. Bu çalışmada, Çizelge 2’de belirtilen parametreler kullanıldı ve yalnızca eğitim verilerine uygulandı. Veri büyütme tekniğinin kodları python yazılımında tasarlandı ve keras kütüphanesinin “Image Data Generator” fonksiyonu kullanılarak işlemler gerçekleştirildi. Çalışmanın analizinde kullanılan veri büyütme parametreleri ve değerleri Çizelge 2’de verildi.

Çizelge 2. Veri büyütme tekniğinde kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
Dönüş aralığı	20
Genişlik kaydırma aralığı	0,15
Yükseklik kaydırma aralığı	0,15
Kesme aralığı	0,15
Yakınlaştırma aralığı	0,15
Yatay çevirme	Doğru
Doldurma modu	En yakın

3.2. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemlerinin temel amacı, ESA mimarisinde en iyi öğrenme gerçekleşene kadar her aşamada ağırlıkları güncellemektir [15]. Bu çalışmada, Olasılıksal Dereceli Azalma (ODA)-Stochastic Gradient Descent (SGD) ve Uyarlanabilir Moment Tahmini (UMT) - Adaptive Moment Estimation (ADAM) optimizasyon yöntemleri kullanıldı. ODA yönteminde, ağırlık güncellemesi her eğitim seti için gerçekleştirildi. Bu nedenle hedefe olabildiğince erken ulaşmaya çalışıldı. ODA yönteminin formülü Eşitlik 1'de verildi. Eşitlik 1 incelendiğinde; θ değişkeni güncellenecek ağırlık vektörünü; α , öğrenme katsayısını ve $\nabla_{\theta} J(\theta)$ maliyet fonksiyonunu temsil etmektedir. Koordinat düzlemindeki özellik konumunu x ve y değişkenleri, temsil etmektedir [16].

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \alpha \nabla_{\theta} J(\theta; x^i, y^i) \quad (1)$$

UMT yöntemi, her yinelemede öğrenme katsayısını güncelleyen yöntemlerden biridir. Bu yöntem, RMSProp yönteminin avantajları ile tasarlanmıştır. UMT yönteminin maliyetini hesaplarken Eşitlik 2 ile Eşitlik 6 arasındaki matematiksel formüller kullanılmaktadır.

Bu eşitliklerdeki değişkenler m_t ve v_t sırasıyla gradyanların tahmin edilen ilk momentini ve ikinci momentini göstermektedir. m_t ve v_t 'nin başlangıç değerleri genellikle sıfır olarak kabul edilmektedir. Birinci ve ikinci momentler, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'e göre; maliyet fonksiyonu ise Eşitlik 6'ya göre hesaplanmaktadır [17,18]. Bu çalışmada kullanılan diğer değerler; β_1 için 0,99, β_2 için 0,99 ve ϵ için 10^{-8} olarak tercih edilmiştir.

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (2)$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (3)$$

$$m_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \quad (4)$$

$$v_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (5)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{v_t + \epsilon}} m_t \quad (6)$$

3.3. Önerilen Yaklaşım

Önerilen model, python yazılım dilinde tasarlandı. Mimari yapısında; evrişimsel, havuzlama, seyreltme ve yoğunluk gibi katmanları içerir [19]. Evrişimsel katman, girdi görüntüleri üzerinde filtreler (2x2, 3x3 vb.) gezdirilerek görüntü içerisinde verimli özelliklerin çıkartılmasını ve aktivasyon haritaların oluşmasını sağlamaktadır. Havuzlama katmanı, genelde evrişimsel katmanlardan sonra tercih edilmektedir ve aktivasyon girdilerinin boyutunu verimliliği etkilemeyecek şekilde düşürmektedir [20]. Seyreltme katmanı, girdi değerlerinde eş değer gördüğü değerleri yok sayarak, modelin sığ bir yapıda eğitilmesini önlemektedir [21]. Yoğunluk katmanı, tam bağlantılı katman gibi modelin son katmanlarında tercih edilmektedir. Bu katman bir önceki katmandan gelen tüm çıkış değerlerini tek bir düğüm noktasında toplar ve sınıflandırma sürecinde kullanılacak fonksiyona olasılık tabanlı değerlerin hazırlanmasına yardımcı olmaktadır [22]. Önerilen modelin yapısı hakkında detaylı bilgi Çizelge 3'te verildi. Modelin girdi boyutu 224x224 olarak ayarlandı. Evrişimsel katmanların filtre boyutu (3x3, 5x5, 8x8) olarak seçildi. Eğitim sürecini kolaylaştırmak, zamandan kazanç sağlamak için her bir evrişimsel katman içerisinde sızdıran ReLU kullanıldı. Maksimum havuzlama katmanlarının filtre boyutu (2x2) seçildi ve ortalama havuzlama katmanlarının filtre boyutu (3x3) seçildi. Önerilen modelin son katmanlarına doğru seyreltme katmanı kullanıldı ve bu katman için tercih edilen oranlar 0,2 ile 0,5'ti. Sınıflandırma sürecinde Softmax fonksiyonunun çıkış değeri 4 olarak ayarlandı.

Önerilen modelde kullanılan dikkat modülü girdi görüntülerinde modelin odaklanması gereken bölgeleri tespit ederek, eğitim başarımını artırmaktadır. Dikkat modülleri önerilen yaklaşımda ilgili katmandan (seyreltme katmanı) sonra blok olarak kullanıldı. Bu blok içerisinde dört adet evrişimsel katman bulunmaktadır. Girdi

özellikleri normalizasyon işleminden geçirildikten sonra evrişimsel katmanlar tarafından (1x1) filtreler dolaştırılarak aktivasyon haritalar oluşturuldu. Aktivasyon haritalarında dikkat edilecek bölgelerin özelliklerini bulabilmek için "up_c2" fonksiyonu

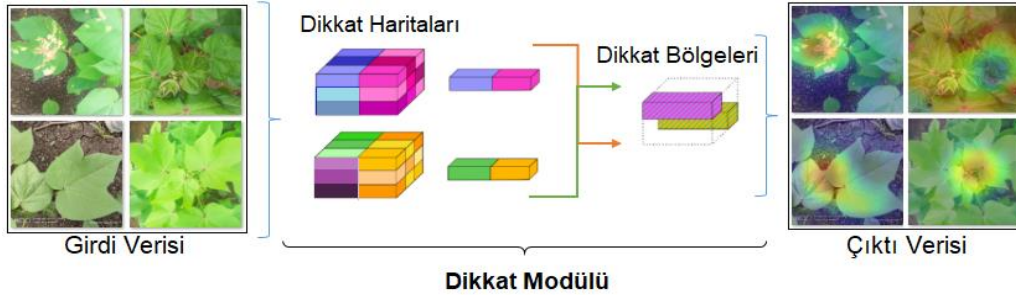
kullanıldı. Son aşamada ortalama havuzlama katmanı kullanılarak piksel sayısına göre yeniden ölçeklendirme yapıldı. Bu işlem "Lambda" katmanı sayesinde gerçekleşti ve dikkat bölgeleri elde edildi.

Çizelge 3. Önerilen modelin yapısı ve tercih edilmiş parametre değerleri

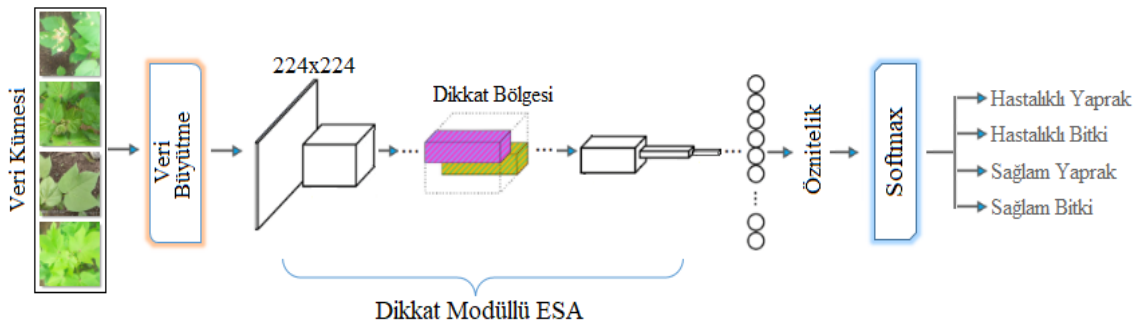
Katman/Fonksiyon	Giriş kanal sayısı	Adım boyutu/Değer
Evrişimsel	64	3x3
Sızdıran ReLU	-	-
Maksimum havuzlama	-	2x2
Seyreltme	-	0,5
Evrişimsel	64	5x5
Sızdıran ReLU	-	-
Maksimum havuzlama	-	2x2
Seyreltme	-	0,5
Evrişimsel	16	8x8
Sızdıran ReLU	-	-
Maksimum havuzlama	-	2x2
Seyreltme	-	0,5
Dikkat modül	1	2x2
Evrişimsel	512	5x5
Sızdıran ReLU	-	-
Ortalama havuzlama	512	3x3
Seyreltme	-	0,5
Ortalama havuzlama	512	3x3
Yoğunluk	512	-
Sızdıran ReLU	-	-
Yoğunluk	512	-
Seyreltme	-	0,2
Seyreltme	-	0,2
Yoğunluk	1024	-
Softmax	Çıkış = 4	

Bu çalışmada kullanılan dikkat modülünün örnek görüntü kümesi Şekil 3'te gösterildi. Sınıflandırma sürecinde önerilen modelin son katmanında Softmax fonksiyonu kullanıldı. Softmax aktivasyon fonksiyonu, genellikle ESA mimarilerinin son katmanında kullanılmaktadır. Amacı, doğrusal olmayan bir regresyon sürecinin sonunda bir önceki

katmanın özelliklerinin normalize edilmesini sağlamaktır. Daha sonra normalize edilmiş değerleri olasılıklara dönüşmekte ve sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir [23]. Önerilen yaklaşımın tasarımı Şekil 4'te gösterildi. Önerilen yaklaşım ile pamuk hastalığının tespitini gerçekleştirmeyi amaçlanarak tasarlandı.



Şekil 3. Dikkat modülünün örnek girdi görüntüleri üzerinde uygulanması [24]



Şekil 4. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen yaklaşım ve deneysel çalışmalar için Jupyter Notebook arayüzü kullanıldı. Yazılım kodları, Google Colab sunucusu kullanılarak derlendi. Donanımsal gereksinimler Google Sunucuları tarafından sağlandı. Deneysel analizler ve sonuçların değerlendirilmesi için karmaşıklık matrisi kullanıldı. Karmaşıklık matrisinin hesaplanmasında kullanılan metrikler; duyarlılık (Duy), özgüllük (Özg), hassasiyet (Has), f-skoru (F-skr) ve doğruluk (Dğr). Metrikler, Eşitlik 7 ile Eşitlik 11 arasındaki formüller ile hesaplanmaktadır. Bu eşitliklerde kullanılan parametreler; Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Pozitif (YP), Yanlış Negatif (YN)'dir [25,26].

$$Duy = \frac{DP}{DP+DN} \quad (7)$$

$$Özg = \frac{DN}{DN+DP} \quad (8)$$

$$Has = \frac{DP}{DP+YP} \quad (9)$$

$$F-skr = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (10)$$

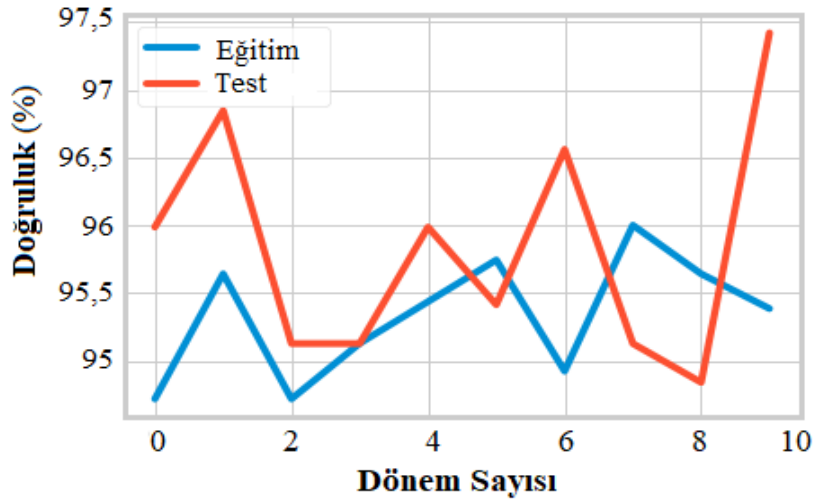
$$Dğr = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (11)$$

Çalışmanın veri seti, test ve eğitim verilerinden oluşmaktadır. Minimum seri boyutu, veri kümesinin alt görüntü kümelerine ayrılacak şekilde eş zamanlı olarak grupsal olarak seri bir şekilde model tarafından eğitime sürecidir. Minimum seri boyutu, donanımsal gereksinimlere bağlıdır [27]. Bu çalışma için minimum seri boyutu 32 olarak belirlendi. Dönem sayısı, 10 tercih edildi ve kayıp fonksiyonu "kategorik çapraz entropi" seçildi. Deneysel analizler iki optimizasyon yöntemi için gerçekleştirildi. ODA optimizasyon yöntemi ile ilk deney analizi gerçekleştirildi.

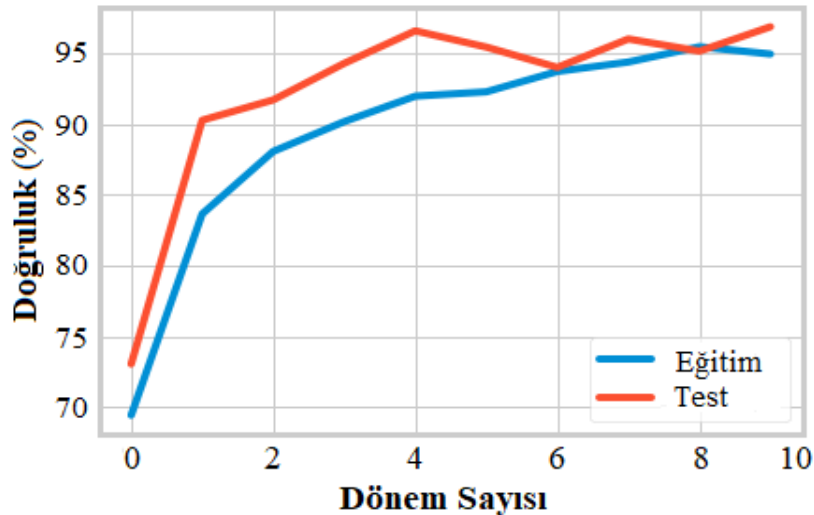
ODA yöntemi ile elde edilen genel doğruluk başarısı %95,70 olarak bulundu. Birinci analiz eğitim ve test başarı grafiği Şekil 5'te gösterildi. Hastalıklı yaprak verilerinde %98,52; hastalıklı bitki verilerinde %98,23; sağlam yapraklarda %97,09 ve sağlam bitkilerde %97,37 olarak elde

edildi. Deneyin ikinci analizinde UMT yöntemi kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi. Önerilen yaklaşımın UMT yöntemi ile %96,56 oranında genel doğruluk başarıları elde edildi. UMT yöntemi ile sınıf tabanlı doğruluk başarıları; hastalıklı yaprak verilerinde %98,54; hastalıklı bitki verilerinde %99,12; sağlam yapraklarda %97,97 ve sağlam bitkilerde %97,40 olarak elde edildi. Optimizasyon yöntemleri arasında UMT daha başarılı bir sonuç verdi. Ayrıca, f-skor başarıları oranında da UMT yöntemi ile gerçekleştirilen

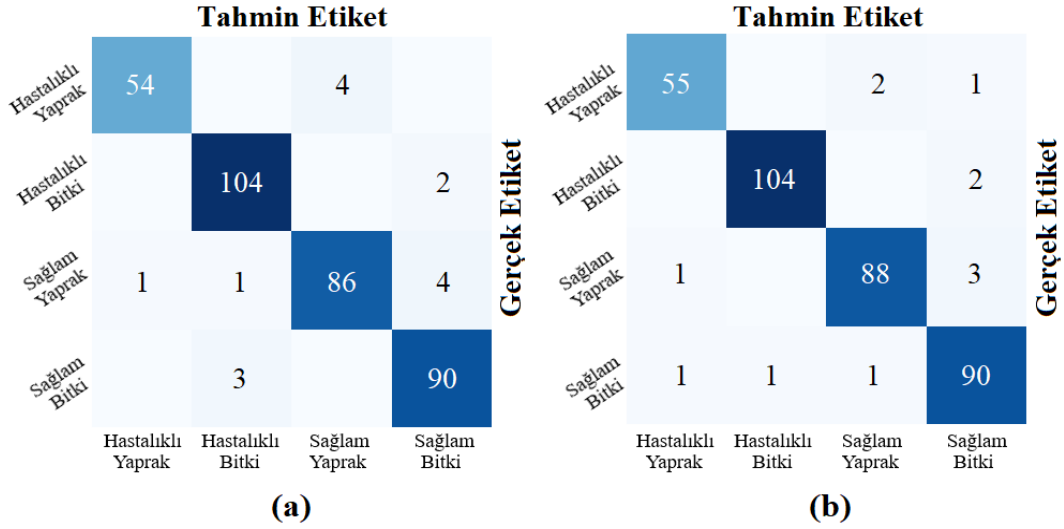
analizin diğer yöntemin analizine göre daha başarılı olduğu görüldü. İkinci analizin eğitim ve test başarıları grafiği Şekil 6'da gösterildi. Deneysel analizlerden elde edilen karmaşıklık matrisleri Şekil 7'de gösterildi. Karmaşıklık matrislerinden elde edilen metrik tabanlı performans bilgileri ise Çizelge 4'te verildi. ODA yöntemi ile UMT yönteminin analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 8'de gösterildi. Tüm sınıf türlerinde UMT yöntemi ile elde edilen doğruluk oranları daha yüksekti.



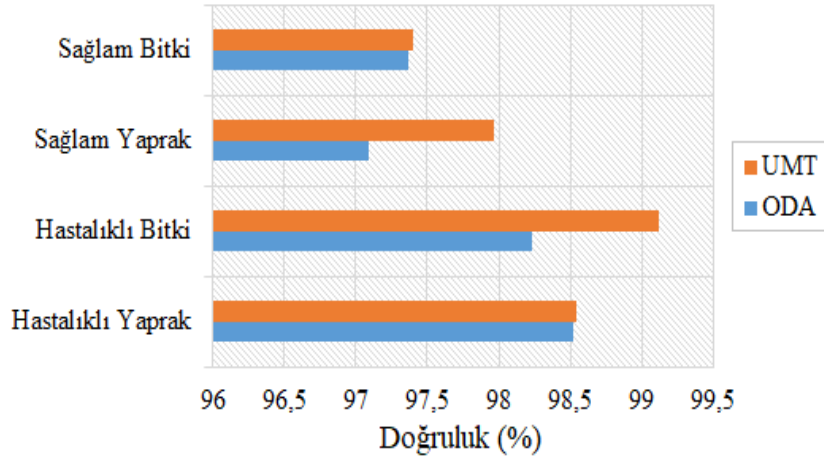
Şekil 5. Önerilen Yaklaşımın ODA optimizasyon yöntemi ile elde edilen doğruluk başarı grafiği



Şekil 6. Önerilen yaklaşımın UMT optimizasyon yöntemi ile elde edilen doğruluk başarı grafiği



Şekil 7. Deneysel analizler sonucu tercih edilen optimizasyon yöntemine göre elde edilen karmaşıklık matrisleri; a) ODA optimizasyon yöntemi, b) UMT optimizasyon yöntemi



Şekil 8. Deneysel analizlerin sınıf türlerine göre karşılaştırılması

Çizelge 4. Deneysel analizlerden elde edilen karmaşıklık matrislerinin metrik sonuçları (%)

Optimizasyon	Sınıf	F-Skr.	Duy.	Özg.	Has.	Dğr.	Genel Dğr.
ODA	Hastalıklı yaprak	95,57	93,10	99,64	98,18	98,52	95,70
	Hastalıklı bitki	97,19	98,11	98,29	96,29	98,23	
	Sağlam yaprak	94,50	93,47	98,41	95,55	97,09	
	Sağlam bitki	95,23	96,77	97,60	93,75	97,37	
UMT	Hastalıklı yaprak	95,65	94,83	99,29	96,49	98,54	96,56
	Hastalıklı bitki	98,57	98,11	99,57	99,05	99,12	
	Sağlam yaprak	96,17	95,65	98,81	96,70	97,97	
	Sağlam bitki	95,24	96,77	97,63	93,75	97,40	

5. TARTIŞMA

Tarımsal faaliyetlerde son zamanlarda yapay zekâ destekli birçok çalışma gerçekleştirilmiştir ve bu durum her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Bu yönüyle yapay zekâ insanların ve dolayısıyla ülkelerin ekonomisini doğrudan etkileyen bir alan olarak öne çıkmaktadır. Ülkemizde pamuk yetiştiriciliği, ekonomik değeri olan ve birçok sanayi alanında talep gören tarımsal bir bitkidir. Dolayısıyla pamukların yetişmesini olumsuz etkileyen pamuk hastalığının erken tespiti önemlidir. Bu çalışmada, pamuk hastalığının tespiti yapılarak, bitki görüntüleri üzerinde analizler gerçekleştirildi. Önerilen yaklaşımın en önemli avantajı, dikkat modülünün görüntü verilerinde odaklanması, gereken hastalıklı bölgelerin tespit edilmesi ve modelin eğitimi için bu bölgelerin kullanılması amaçlanmıştır. Böylece önerilen model eğitilirken verimli öznelikler çıkartıldı ve modelin sınıflandırma performansına katkısı görüldü.

Önerilen yaklaşımda yöntem ve parametre tercihleri önem arz etmektedir. Nitekim, deneysel analizlerde gerçekleştirilen optimizasyon yöntemi seçiminde bile performans sonuçları arasında belirgin bir fark oluşturması, bu duruma örnektir. Önerilen yaklaşımın dezavantajlı yöntemi olarak belki de model içerisinde katmanlar ve tercih edilen parametrelerin yeniden iyileştirilmesi gerekebilir.

6. SONUÇ

Türkiye gibi birçok ülke tarıma dayalı bir ekonomiye sahiptir. Ülkemizde pamuk hem tarımsal faaliyetlerde hem de sanayi kollarında rağbet gören bir bitki türüdür. Güneydoğu, Akdeniz ve Ege bölgeleri pamuk yetiştiriciliğinde ön sıralarda yer almaktadır. Pamuk yetiştiriciliğinde pamuk bitkisinden elde edilen verim önemlidir. Bu verimliliği olumsuz etkileyen hastalık türlerinin erken tespiti ve gerekli müdahalelerin zamanında yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada pamuk hastalığının tespitinde yapay zekâ destekli bir yaklaşım sunuldu. Önerilen yaklaşımın dikkat modüllerinden oluşması, derin öğrenme modelinin performansına katkı sağladı.

Ayrıca, doğru bir optimizasyon yönteminin tercihi model eğitime katkı sunduğu bu çalışmada görüldü. UBT optimizasyon yöntemi ile hastalıklı yaprak verilerinde %98,54; hastalıklı bitki verilerinde %99,12; sağlam yapraklarda %97,97 ve sağlam bitkilerde %97,40 doğruluk oranları elde edildi.

Gelecek çalışmada, dikkat modüllerini farklı yöntem ve yaklaşım içeren yapay zekâ destekli modeller üzerinde eğitimi gerçekleştirilecektir ve çeşitli makine öğrenme yöntemleri ile başarıları kıyaslanacaktır.

7. KAYNAKLAR

1. Chohan, S., Perveen, R., Abid, M., Tahir, M.N., Sajid, M., 2020. Cotton Diseases and Their Management BT-Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies. In: Ahmad S, Hasanuzzaman M (eds). Springer Singapore, Singapore, 239–270.
2. Eski, Ö., Kayalak, S., 2018. Türkiye’de Pamuk Üretimi için Bir Öngörü Modeli: Var Yaklaşımı. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 6, 131–137. <https://doi.org/10.33202/comuagri.503960>.
3. 2019 Pamuk Bülteni, <https://www.tarimorman.gov.tr>, Erişim Tarihi: 09.08.2020.
4. Çoban, M., Çiçek, S., Küçüktaban, F., Yazıcı, L., Çiftçi, H., 2016. Bazı Pamuk Melezlerinin Verim ve Lif Kalite Özelliklerinin İncelenmesi. Tarla Bitkileri Merkezi Araştırma Enstitüsü Dergisi, 25(2), 112–112. <https://doi.org/10.21566/tarbitderg.281873>.
5. Çopur, O., 2018. GAP Projesinin Türkiye Pamuk Üretimine Etkisi: Son On Yıldaki Değişimler. Adyütayam, 6(1), 11–18.
6. Çelik, İ., Soysal, M., İnan, Ö., Çetinkaya, M., 2010. Antalya Bölgesinde Pamuk Solgunluk Hastalığı (*Verticillium dahliae*) Surveyi. Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi, 27(1), 18–32.
7. Sakçı, N., Sağır, A., Temiz, M.G., 2017. Pamukta Solgunluk Hastalığı (*Verticillium Dahliae* Kleb.)’nın Tohumun İçeriğine Etkisinin Belirlenmesi. Bitki Koruma Bülteni, 57(1),1-11. <https://doi.org/10.16955/bitkorb.299002>.

8. Ferro, H.M., Souza, R.M., Lelis, F.M.V., Silva, J.C.P., Medeiros, F.H.V.D., 2020. Bacteria for Cotton Plant Protection: Disease Control Crop Yield and Fiber Quality. *Rev Caatinga* 33(1), 43–53.
9. Shah, N., Jain, S., 2019. Detection of Disease in Cotton Leaf using Artificial Neural Network. In: 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence, 473–476.
10. Chowdhary, K.N., Nithin, Y.M., Srikanta, P., Rekha, B.S., 2018. A Machine Learning Approach for Detection of Cotton Leaf Disease. *Int. J. Sci. Res. Dev.*, 6(3), 1902–1905.
11. Pechuho, N., Khan, Q., Kalwar, S., 2020. Cotton Crop Disease Detection using Machine Learning via Tensorflow. *Pakistan J. Eng. Technol.*, SI(1), 126-130.
12. Gulhane, V.A., Gurjar, A.A., 2011. Detection of Diseases on Cotton Leaves and its Possible Diagnosis. *Int J Image*, 5(5), 590–598.
13. Bhoi, J., 2020. Cotton Disease Dataset. In: Kaggle. <https://www.kaggle.com/janmejybhoy/cotton-disease-dataset>. Accessed 29 Oct 2020.
14. Shorten, C., Khoshgoftaar, T.M., 2019. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *J. Big Data*, 6(60), 1-48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>
15. Sun, S., Cao, Z., Zhu, H., Zhao, J., 2020. A Survey of Optimization Methods from a Machine Learning Perspective. *IEEE Trans Cybern*, 50, 3668–3681. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2019.2950779>
16. Kennedy, R.K.L., Khoshgoftaar, T.M., Villanustre, F., Humphrey, T., 2019. A Parallel and Distributed Stochastic Gradient Descent Implementation Using Commodity Clusters. *J. Big Data*, 6(16) 1-23. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0179-2>.
17. Kumar, A., Sarkar, S., Pradhan, C., 2020. Malaria Disease Detection Using CNN Technique with SGD, RMSprop and ADAM Optimizers. In: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 211–230.
18. Zhong, H., Chen, Z., Qin, C., Huang, Z., Zheng, V.W., Xu, T., Chen, E., 2020. Adam Revisited: A Weighted Past Gradients Perspective. *Front Comput Sci*, 14(5), 145309. <https://doi.org/10.1007/s11704-019-8457-x>.
19. Chauhan, K., 2020. CNN-Attention: An Image Classifier with Attention Layers Visualized. In: GitHub. <https://github.com/kapilnchauhan77/CNN-Attention>. Accessed 31 Oct 2020.
20. Suárez-Paniagua, V., Segura-Bedmar, I., 2018. Evaluation of Pooling Operations in Convolutional Architectures for Drug-drug Interaction Extraction. *BMC Bioinformatics* 19, 209. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2195-1>.
21. Jiang, X., Lu, M., Wang, S.H., 2020. An Eight-layer Convolutional Neural Network with Stochastic Pooling, Batch Normalization and Dropout for Fingerspelling Recognition of Chinese Sign Language. *Multimed Tools Appl* 79, 15697–15715. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08345-y>.
22. Yang, Y., Wu, Q.M.J., Feng, X., Akilan, T., 2020. Recomputation of the Dense Layers for Performance Improvement of DCNN. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 42, 2912–2925. <https://doi.org/10.1109/tpami.2019.2917685>
23. Luo, Y., Wong, Y., Kankanhalli, M., Zhao, Q., 2020. Softmax: Improving Intra-class Compactness and Inter-class Separability of Features. *IEEE Trans Neural Networks Learn Syst*, 31, 685–699. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2019.2909737>
24. Bello, I., Zoph, B., Le, Q.V., Vaswani, A., Shlens, J., 2019. Attention Augmented Convolutional Networks. *Proc IEEE Int Conf Comput Vis 2019-Octob*: 3286–3295. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00338>.
25. Gadekallu, T.R., Khare, N., Bhattacharya, S., Singh, S., Maddikunta, P.K.R., Srivastava, G., 2020. Deep Neural Networks to Predict Diabetic Retinopathy. *J Ambient Intell Humaniz Comput*. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01963-7>.
26. Chicco, D., Jurman, G., 2020. The Advantages of the Matthews Correlation Coefficient (MCC) Over F1 Score and Accuracy in Binary Classification Evaluation. *BMC Genomics*, 21, 6. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>.
27. Kandel, I., Castelli, M., 2020. The Effect of Batch Size on the Generalizability of the Convolutional Neural Networks on a Histopathology Dataset, *ICT Express*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ict.2020.04.010>.

The Effect of Using Different Refrigerants on System Performance in Two-Stage Organic Rankine Cycle

Ahmet KAPLAN*¹, Arif OZBEK²

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

²Çukurova University, Faculty of Ceyhan Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 29.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

In this study, energy analysis of a double-stage Organic Rankine Cycle (ORC) was performed using the Engineering Equation Solver program (EES). In the first and second stages, eight different organic working fluids (R134a, R410a, RC318, R407c, R22, R23, R116, and R218) were used in pairs for certain temperature limits. Choosing a suitable refrigerant or refrigerant pair is crucial for the ORC's high thermal efficiency and net work output value. This study aims to determine the effect of working fluid on system efficiency and find out the most suitable working fluid pair. The results showed that the highest net power output and the highest thermal efficiency were obtained from the R23+R23 pair. It was also observed that the lowest net power output from the RC318+RC318 pair and the lowest thermal efficiency was obtained from the R218+R218 pair.

Keywords: Organic rankine cycle, Double stage cycle, Solar power

İki Aşamalı Organik Rankine Çevriminde Farklı Soğutucu Akışkan Kullanımının Sistem Performansına Etkisi

Özet

Bu çalışmada mühendislik denklem çözücü program (Engineering Equation Solver - EES) kullanılarak iki kademeli bir Organik Rankine Çevriminin (ORC) enerji analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci kademelerde sekiz farklı organik akışkan (R134a, R410a, RC318, R407c, R22, R23, R116 ve R218) çiftler halinde belirli sıcaklık limitleri arasında kullanılmıştır. ORC'nin yüksek ısı verim ve net iş çıkışı için uygun bir soğutucu akışkan veya soğutucu akışkan çifti seçimi yapmak çok önemlidir. Bu çalışmanın amacı, çevrim akışkanının sistem verimine etkisini belirlemek ve en uygun akışkan çiftini bulmaktır. Sonuçlar, en yüksek net güç çıkışının ve en yüksek termal verimin R23+R23 çiftinden elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca en düşük net güç çıkışının RC318+RC318 çiftinden ve en düşük termal verimin ise R218+R218 çiftinden elde edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik rankine çevrimi, İki aşamalı çevrim, Güneş enerjisi

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): Ahmet KAPLAN, ahmttkplnn@gmail.com

1. INTRODUCTION

Power generation from waste heat, turbine exhaust, solar and biomass energy is becoming a popular way to generate alternative energy for industry. Low heat sources can be converted to electrical energy and these can be used in an ORC system design. Basic principles of ORC, very similar to the conventional Rankine cycle. However, the main difference is the use of organic working fluid of the ORC [1]. Also, Rankine cycle requires minimum power to be competitive and high collector temperature [2]. The main problems for generating power economically with water/steam driven working cycles is that low (<230 °C) and medium (230 °C-640 °C) temperature heat sources are not suitable [3]. Also when using water as a working fluid, many problems are encountered: during expansion need of superheating to prevent condensation, excess pressure in the evaporator, risk of erosion of turbine blades, expensive and complex turbines [4]. Various cycles such as organic Rankine, supercritical Rankine, Kalina, Goswami and triple flash cycles have been investigated for the generation of electrical energy from low temperature heat sources [5]. However, ORCs have a much simpler cycle than other cycles such as the Kalina cycle or triple flash cycles [6]. Compared to the conventional Rankine cycle ORC, they require a less complicated control system and their components are a lot cheaper [7]. In 1825 Thomas Howard developed the first ORC engines. The working fluid was alcohol or ether. In 1967, the Soviet Union's first geothermal binary ORC was developed on the Kamchatka peninsula. The capacity was 680 kW and the working fluid was R-12 [8]. ORC technology is a promising and proven technology that is considered an essential solution for low and medium temperatures (especially between 300–450 °C). Low-temperature heat is converted into useful work, which itself can be converted into electricity [9]. The advantage of ORC is that various working fluids can be used first. Second, the working fluid is mostly dry fluid. Third, the working fluid has a relatively low evaporation temperature. ORC also has disadvantages, one of which is its poor heat transfer coefficient. Second, most organic liquids are poisonous and highly flammable. Therefore,

the “shell and tube” type heat exchanger is easily adopted in the ORC system [10]. Numerous researchers have extensively studied the organic Rankine Cycle, focusing mainly on system structure, working fluid, and optimization of cycle parameters [11]. The refrigerants studied found that the ORC's most suitable working fluid for small-scale solar applications was R134a [12]. A bad working fluid choice could lead to a low efficient and expensive plant [13]. That means suitable fluid should have properties of high efficiency, low specific volumes and moderate pressures in the heat exchangers, low toxicity, low cost, low Ozone Depletion Potential (ODP) and low Global Warming Potential (GWP), among others [14]. The selection of the working fluid is determined by the application and the waste heat level and plays a significant role in the use of the ORC process [15].

In this paper, energy analysis of a double-stage Organic Rankine Cycle (ORC) was performed using the Engineering Equation Solver program (EES). In the first and second stages, R134a, R410a, RC318, R407c, R22, R23, R116 and R218 organic fluids were used in pairs for certain temperature limits. In order to obtain the best thermal efficiency and network output value from ORC to find out, a suitable fluid or fluid pair has been tried to determine.

2-MATERIAL AND METHOD

2.1. System Description

Figure 1 shows the double stage ORC system designed. In this system, the solar collector acts as a heater. The evaporator of the first stage takes the heat from the solar collector and delivers that heat to the working fluid of the first stage. After the turbine-I, the fluid is still in the superheated gas state and this heat is used as the second-stage working fluid in a Re-evaporator. After the turbine-II, the regenerator heats the compressed liquid as a pre-heater. The water is used as a cooler at both condensers. According to ASHRAE 34 Refrigerant Safety Classification group A, all refrigerants have been determined, which means low toxicity and no flame propagation group.

ASHRAE 34 refrigerant safety classification is shown in Table 1. The first stage's working fluid and the second stage's working fluid have been set as the same refrigerant. The effectiveness-NTU method is used to model the Evaporator and Re-evaporator heat exchangers.

According to the ASHRAE standard 34, there are two classes of toxicity (A: non-toxic B: toxic.) and three groups of flammability characteristics (1: no flame propagation, 2: low flammability limit and 3: high flammability limit) [16].

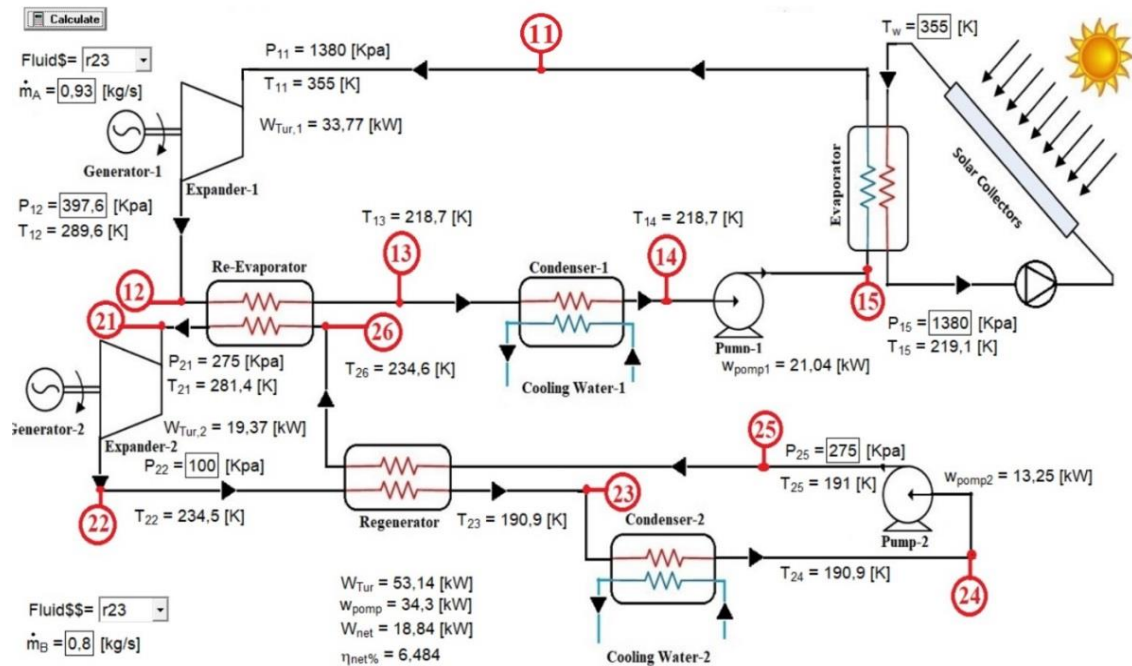


Figure 1. Schematic representation of Double Stage SORC system.

Table 1. ASHRAE 34 refrigerant safety classification

	Lower toxicity	Higher toxicity
Higher flammability	A3	B3
Lower flammability	A2	B2
No flame propagation	A1	B1

This system consists of two stages. In the first and second stages, the same fluid is used and the heat taken from the solar collector is converted into electrical energy. Solar collector can be change with all of the heat sources like geothermal energy, natural gas, waste heat, etc.. The system operates with a constant mass flow rate of 0.93 kg/s and 0.8 kg/s in the first and second stages, respectively. In

addition, the working pressure is constant in all components and refrigerant pairs. Calculations were made between 355K, the lowest temperature at which all fluids can work together, and 425K, the highest temperature at which they can work.

Figure 2 illustrates the pressure/enthalpy diagram of the double-stage Rankine cycle designed with R23 at each stage. The points in the first stage show: 11-12 is the turbine, 12-13 is the re-evaporator, 13-14 is a condenser, 14-15 is a pump, and 15-11 is the evaporator where heat is gained from the solar collector. The points in the second stage show: 21-22 is a turbine, 22-23 is a regenerator, 23-24 is a condenser, 24-25 is a pump, and 25-21 is an evaporator where heat is gained from re-evaporator.

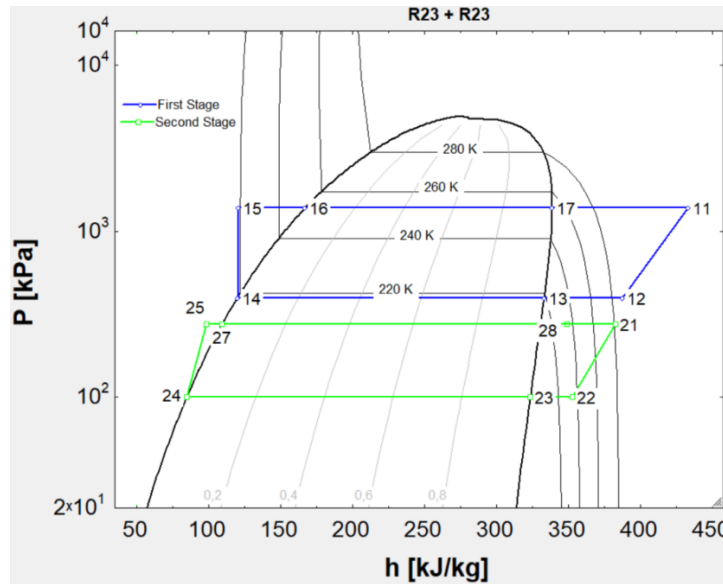


Figure 2. Pressure/enthalpy chart of double-stage Rankine cycle with R23 at each stage

2.1.1. Organic Refrigerants

Good working fluid should have a low steam and low liquid specific volume [17]. The specific volume of the fluid pressure in the

condenser should be as small as possible to minimize the required feed pump work [16]. Table 2 shows physical, safety and environmental data of the working fluids used in the analyses.

Table 2. Physical, safety and environmental data of the working fluids

Substance	Molecular mass (kg/kmol)	T_{bp} (°C)	T_{cr} (°C)	P_{cr} (MPa)	ASHRAE 34 safety group	Atmospheric life time (yr)	ODP	GWP (100 yr)
R134a	102.03	-26.1	101.1	4.06	A1	13.4	0	1370
R410a	72.58	-51.4	71.4	4.90	A1	-	0	2100
RC318	200.03	-6.0	115.2	2.778	A1	3200	0	10250
R407C	86.20	-43.6	86.8	4.597	A1	n.a	0	1800
R22	86.47	-40.8	96.1	4.99	A1	11.9	0.040	1790
R23	70.01	-82.0	26.1	4.83	A1	222	0	14200
R116	138.01	-78.1	19.9	3.05	A1	10000	0	12200
R218	188.02	-36.8	71.9	2.64	A1	2600	0	8830

T_{bp} : Normal boiling point; T_{cr} : Critical temperature; P_{cr} : Critical pressure; ODP: Ozone depletion potential, relative to R-11; GWP: Global warming potential, relative to CO₂. n.a: non available.

2.1.2. Thermodynamic Analysis

Rankine cycles with four components (pump, boiler, turbine and condenser) are constant-flow devices and therefore, all arithmetic operations constituting the Rankine cycle can be analyzed as the fixed-flow process. Kinetic and potential

energy, work, and is small compared to the heat transfer terms are often ignored [18].

It is assumed that the pump and turbine are isentropic. The boiler and condenser do not require any work. Then the conservation of energy relationship for each device can be expressed as:

Stage -I Processes:

Process 11 - 12 is the actual expansion process in the Turbine-I.

$$\dot{W}_{T-I} = \dot{m}_I \times (h_{11} - h_{12}) \times \eta_m \quad (1)$$

The isentropic efficiency of Turbine-I is $\eta_{T-I} = 0.8$ at the designed condition.

Process 12 – 13 is the desuperheated process with Re-evaporator.

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_I \times (h_{12} - h_{13}) \quad (2)$$

Process 13 – 14 is the condensation process.

$$\dot{Q}_{out-I} = \dot{m}_I \times (h_{13} - h_{14}) \quad (3)$$

Process 14 – 15 is the pumping process.

$$\dot{W}_{p-I} = \dot{m}_I \times (h_{14} - h_{15}) \times \eta_p \quad (4)$$

The pump efficiency is $\eta_{p-I} = 0.8$ at the designed condition.

Process 15 – 11 is the heating process by a solar collector.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_I \times (h_{11} - h_{15}) \quad (5)$$

Stage-II Processes:

Process 21 - 22 is the actual expansion process in the Turbine-II.

$$\dot{W}_{T-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{21} - h_{22}) \times \eta_{T-II} \quad (6)$$

The isentropic efficiency of an expander is $\eta_{T-2} = 0.8$ at the designed condition.

Process 22 – 23 is the Regenerator process.

$$\dot{Q}_{R-2} = \dot{m}_{II} \times (h_{22} - h_{23}) \quad (7)$$

When the heat source temperature is relatively high, the ORC with a regenerator is better than the basic ORC [19].

Process 23 – 24 is the condensation process.

$$\dot{Q}_{out-2} = \dot{m}_{II} \times (h_{23} - h_{24}) \quad (8)$$

Process 24 – 25 is the pumping process.

$$\dot{W}_{p-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{24} - h_{25}) \times \eta_{p-II} \quad (9)$$

The pump efficiency is $\eta_{p-II} = 0.8$ at the designed condition.

Process 25 – 21 is the heating process by Re-evaporator.

$$\dot{Q}_{in-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{21} - h_{25}) \quad (10)$$

The net electrical power produced by the system is calculated from equation (11).

$$\dot{W}_{net} = (\dot{W}_{T-I} + \dot{W}_{T-II}) - (\dot{W}_{p-I} + \dot{W}_{p-II}) \quad (11)$$

The thermal efficiency of the double stage ORC system is determined from equation (12):

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (12)$$

The effectiveness – NTU Method:

The effectiveness – NTU method was found in Kays and London in 1955. This method greatly simplified heat exchanger analysis [20]. All heat exchangers are calculated by the ϵ -NTU:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}} \quad (13)$$

ϵ is the heat transfer effectiveness which is a dimensionless parameter. Defined as; the ratio of actual heat transfer rate to maximum possible heat transfer rate.

To determine the maximum possible heat transfer rate in a heat exchanger, maximum temperature difference in a heat exchanger is the difference between the inlet temperature of the hot and cold fluids [19].

$$\dot{Q}_{act} = C_h (T_{h-in} - T_{h-out}) = C_c (T_{c-out} - T_{c-in}) \quad (14)$$

C_h and C_c are the heat capacity of the hot and cold fluids, respectively.

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{h-in} - T_{c-in}) \quad (15)$$

The C_{min} is the smaller fluid thermal capacity. The U is the overall heat transfer coefficient.

$$NTU = \frac{U \times A}{C_{min}} \quad (16)$$

NTU is a dimensionless number which means number of transfer unit.

3. RESULT AND DISCUSSIONS

Thermodynamic properties of the R23 refrigerant in the first and second stages were determined with the EES (Engineering Equation Solver) software program. EES simplifies the process and is the assurance that the solver will operate at optimum efficiency. EES automatically identifies and groups equations that need to be solved and uses equations instead of assignments normally used in formal programming languages [21].

The effect on the system in the same situation is calculated by changing the refrigerant pair and turbine inlet temperature (T_{11}).

For Turbine Inlet Temperature is 355K: Table 3 is obtained by using an engineering equation solver (EES). The thermodynamic values of the stage-I using R23 fluid when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 355K.

Table 4 shows the thermodynamic values of the stage-II using R23 fluid when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 355K.

Table 3. Thermodynamic properties of R23 in the stage-I

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg/K)
11	Superheated vapor	355	1380	433.2	1.874
12	Superheated vapor (Scroll Expander)	289.6	397.6	387.8	1.874
13	Superheated vapor	218.7	397.6	333.2	1.658
14	Saturated liquid	218.7	397.6	120	0.6825
15	Sub-cooled liquid (Pump)	219.1	1380	120.8	0.6825
16	Saturated liquid	252.7	1380	167.1	0.8789
17	Saturated vapor	252.7	1380	338.8	1.558

Table 4. Thermodynamic properties of R23 in the stage-II

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg/K)
21	Superheated vapor	281.4	275	383	1.9
22	Superheated vapor (Scroll Expander)	234.5	100	352.7	1.9
23	Superheated vapor	190.9	100	323.7	1.763
24	Saturated liquid	190.9	100	84.91	0.5118
25	Sub-cooled liquid (Pump)	191	275	98.17	0.5118
26	Saturated liquid	210.4	275	109.4	0.6331
27	Saturated vapor	210.4	275	330.7	1.686

Table 5 shows the power output and thermal efficiency values of different fluid pairs when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 355K. According to the results obtained, the highest power output was seen in the R23+R23 pair as 18.84 kW and the highest thermal efficiency was obtained in the RC318+RC318 pair as 6.708.

For Turbine Inlet Temperature is 425K: The thermodynamic values of the stage-I using R23 fluid when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 425K are given in Table 6

Table 7 represents the thermodynamic values of the stage-II using R23 fluid when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 425K.

Table 5. System performance for different refrigerant pairs at 355K

Working fluids	Turbine inlet temperature (K)	Power output (kW)	Thermal efficiency (%)
R134a + R134a	355	14.31	6.251
R410a + R410a	355	18.57	6.165
RC318 + RC318	355	8.097	6.708
R407C + R407C	355	16.24	6.057
R22 + R22	355	15.23	6.235
R23 + R23	355	18.84	6.484
R116 + R116	355	11.47	6.192
R218 + R218	355	8.64	6.083

Table 6. Thermodynamic properties of R23 in the stage-I

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
11	Superheated vapor	425	1380	496.4	2.037
12	Superheated vapor (Scroll Expander)	355.6	397.6	440.1	2.037
13	Superheated vapor	218.7	397.6	333.2	1.658
14	Saturated liquid	218.7	397.6	120	0.6825
15	Sub-cooled liquid (Pump)	219.1	1380	120.8	0.6825
16	Saturated liquid	252.7	1380	167.1	0.8789
17	Saturated vapor	252.7	1380	338.8	1.558

Table 7. Thermodynamic properties of R23 in the stage-II

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
21	Superheated vapor	347.3	275	434.1	2.063
22	Superheated vapor (Scroll Expander)	296.3	100	395.8	2.063
23	Superheated vapor	190.9	100	323.7	1.763
24	Saturated liquid	190.9	100	84.91	0.5118
25	Sub-cooled liquid (Pump)	191	275	101.5	0.5118
26	Saturated liquid	210.4	275	109.4	1.939
27	Saturated vapor	210.4	275	330.7	1.686

Table 8 shows the power output and thermal efficiency values of different fluid pairs when the first turbine inlet temperature (T_{11}) is 425K. According to the results obtained, the system's highest power output and thermal efficiency values

were obtained when using R23+R23 pair as the value of 23.82 kW and 6.818, respectively. This means as seen from table 8, R23+R23 pair gives the highest power output and thermal efficiency when the input temperature of the turbine-I rises

Table 8. System performance for different refrigerant pairs at 425K

Working fluids	Turbine inlet temperature (K)	Power output (kW)	Thermal efficiency (%)
R134a + R134a	425	18.16	6.049
R410a + R410a	425	23.63	6.418
RC318 + RC318	425	9.994	5.338
R407C + R407C	425	20.65	6.13
R22 + R22	425	19.44	6.524
R23 + R23	425	23.82	6.818
R116 + R116	425	14.07	5.736
R218 + R218	425	10.64	5.176

Figure 3 indicates power output values at 355K, 390K and 425K turbine inlet temperature (T_{11}) values for each refrigerant pair. It is observed that the RC318 + RC318 pair gives the lower power output at each temperature value. On the other hand, the R23 + R23 pair gives the higher power

output at each temperature. The lowest power output was obtained as 8.097 kW at 355 K turbine inlet temperature (T_{11}) when using the R318 pair, and the highest value determined as 23.82 kW at 425 K when using the R23 pair.

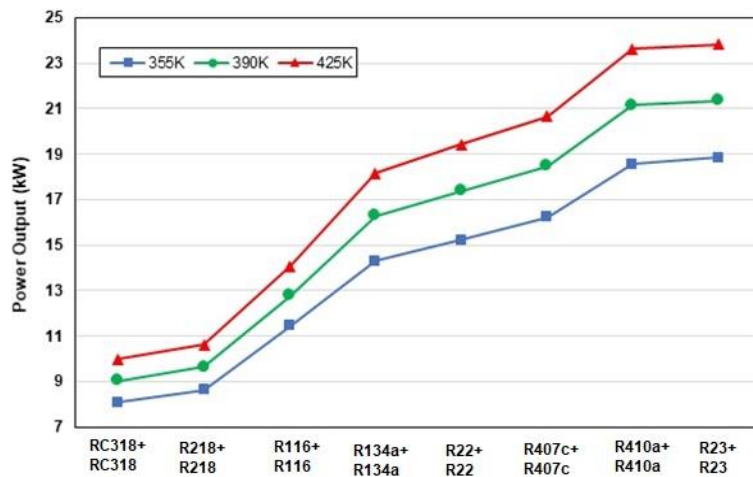


Figure 3. Power outputs when using different working fluid pairs at different temperatures

The relationship between refrigerant pairs for each temperature is presented in Figure 4. Increasing the turbine's inlet temperature has a negative impact on the thermal efficiency of the RC318+RC318 pair. That thermal efficiency dramatically decreases from 6.708 to 5.338. It is observed that

the thermal efficiency of R22, R407c, R410a and R23 increases as the temperature increases. On the other hand, in other refrigerants, the thermal efficiencies decreased as the temperature increased.

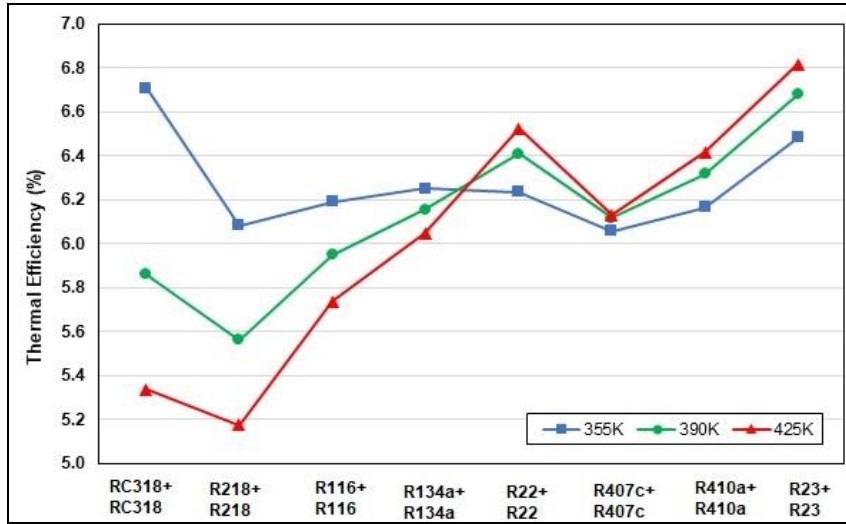


Figure 4. The system’s thermal efficiency value for different working fluid pairs at the 355K, 390K and 425K

Figure 5 shows power output from 8 different fluid pairs according to the turbine inlet temperature. It has been observed that the R410a + R410a pair gives about the same power output as the R23 + R23 pair, with a difference of about one percent at

all temperatures. And between all of the pairs, the RC318+RC318 pair gave the smallest net power output for each turbine inlet temperature (T_{11}) value.

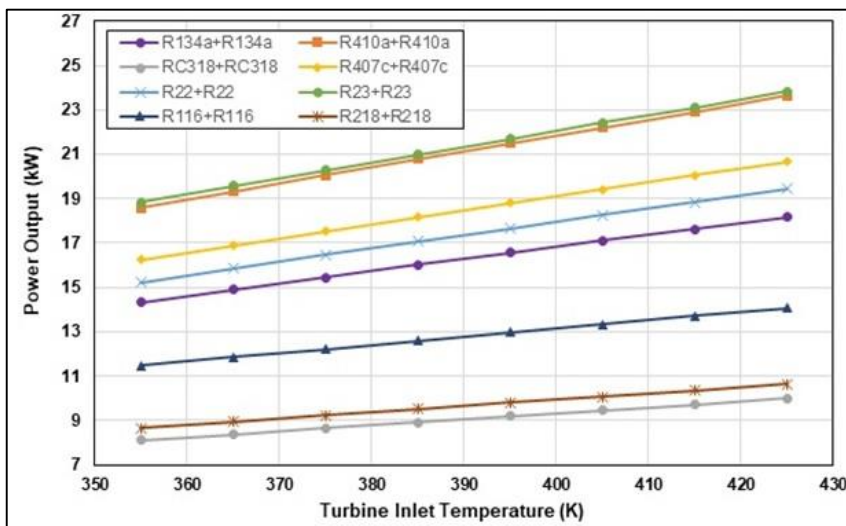


Figure 5. System net power output according to different pairs and temperatures

Figure 6 presents thermal efficiency of the system versus turbine inlet temperature for R134a+R134a, R410a+R410a, RC318+RC318, R407c+R407c,

R22+R22, R23+R23, R116+R116 and R218+R218 refrigerant pairs. It is seen that when the R23+R23 pair is used and turbine inlet temperature is 425 K

in the ORC system, the thermal efficiency is 4.31% greater than the R22+R22 pair. The system's thermal efficiency increases with temperature when R23+R23, R22+R22, R410a+R410a and R407c+R407c refrigerant pairs

use. The thermal efficiency of other pairs decreases when the temperature is increased. On the other hand, when R218+R218 pair is used, the smallest system thermal efficiency value among the other pairs was obtained at all temperatures.

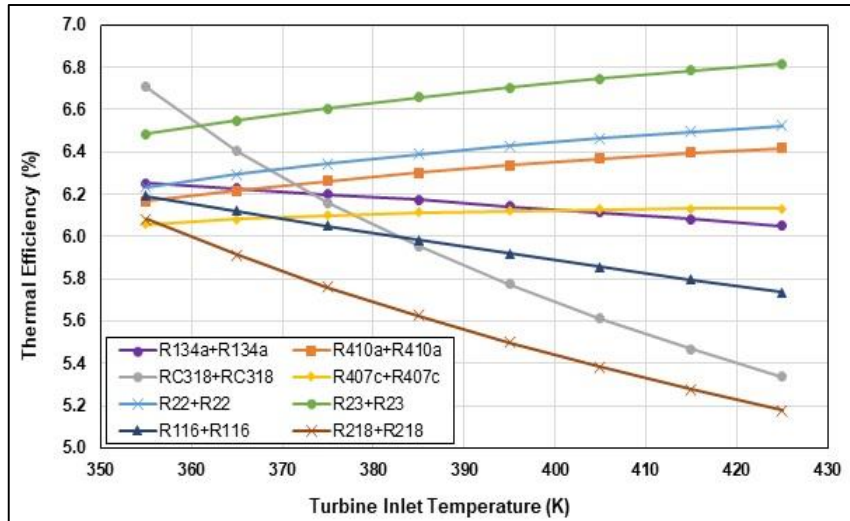


Figure 6. Thermal efficiency of the system versus turbine inlet temperature for different refrigerant pairs

4. CONCLUSION

In this study double stage organic Rankine cycle (ORC) which is heated with the solar collector is solved with the EES program. The results can be summarized as follows:

- Different solar collector temperatures are considered in the present analysis, the highest thermal efficiency and power output are achieved at 425K.
- The thermal efficiency values of the system at 325K turbine inlet temperature are observed as the highest value for the RC318 + RC318 pair. But that thermal efficiency value dramatically decreases when the solar collector temperature is increased.
- Among all refrigerants, R23 can be recommended for all working temperatures. Because R23 + R23 pair gives the highest net

power output and thermal efficiency values for all temperatures and working fluids.

- As the turbine inlet temperature increases, the net power output of the system increases for all refrigerant pairs, but the system's thermal efficiency against turbine inlet temperature increases only when R23, R22, R410a and R407c refrigerant pairs are used.

5. REFERENCES

1. Obafunmi, Jaiyejeje S., 2014. Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycles. Eastern Mediterranean University Gazimağusa, North Cyprus.
2. Quoilin, S., Orsz, M., Hemond., Lemort, V., 2011. Performance and Design Optimization of a Low-cost Solar Organic Rankine Cycle for Remote Power Generation. Solar Energy 85, 955-966.
3. Becquin, G., Lehar, M., 2012. Two Algorithms for Reliable Estimation of Organic Rankine

- Performance. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 134(4), 044504. DOI:10.1115/1.4004839.
4. Wali, E., 2980. Optimum Working Fluids for Solar Powered Rankine Cycle Cooling of Buildings. *Solar Energy*, 25(3), 235–241.
 5. Davidson, T.A., 1977. Design and Analysis of a 1 kW Rankine Power Cycle, Employing a Multi-vane Expander, for Use with a Low Temperature Solar Collector. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
 6. Chen, H., Goswami, D.Y., Stefanakos, E.K., 2010. A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-grade Heat. *Renew Sustain Energy Rev.*, 14(9), 3059–3067.
 7. http://www.clean-energy-ideas.com/geothermal_power.html,
 8. Lee, D.H., 2014. Organic Rankine Cycle Power Generator. 8th Fluid Machinery Core Technology Lecture of Korea Society for Fluid Machinery, 169-179.
 9. Eyidogan, M., Kilic, F.C., Kaya, D., Coban, V., Cagman, S., 2016. Investigation of Organic Rankine Cycle (ORC) Technologies in Turkey from the Technical and Economic Point of View. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58(C), 885-895.
 10. Lim, H.S., Choi, B.S., Park, M.R., Hwang, S.C., Park, J.Y., Seo, J., Bang, J.S., Kim, B.O., 2017. Performance Evaluation of Two-stage Turbine for the Organic Rankine Cycle System. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(12), 5849-5855.
 11. Wang, Q., Wang, J., Li, T., Meng, N., 2020. Techno-economic Performance of Two-stage Series Evaporation Organic Rankine Cycle with Dual-level Heat Sources. *Applied Thermal Engineering*, 171(8), 115078.
 12. Bertrand, F.T., Papadakis, G., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., 2009. Fluid Selection for a Low Temperature Solar Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2468–2476.
 13. Tchanche, B.F., Papadakis, G., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., 2008. Criteria for Working Fluids Selection in Low-temperature Solar Organic Rankine Cycles. in: *Proc. Eurosun Conf.*, Lisbon, Portugal, 1-8.
 14. Maizza, V., Maizza, A., 1996. Working Fluids in Non-steady Flows for Waste Energyrecovery Systems. *Applied Thermal Energy*, 16(7), 579–590.
 15. Borsukiewicz, A., Nowak, W., 2007. Comparative Analysis of Natural and Synthetic Refrigerants in Application to Low Temperature Clausius-rankinecycle. *Energy*, 32, 344–352.
 16. Bertrant, T.F., Papadakis, G., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., 2008. Criteria for Working Fluids Selection in Low-temperature Solar Organic Rankine Cycles. 1st International Congress on Heating. Cooling and Buildings, 1-8.
 17. Badr, O., Probert, S.D., O'Callaghan, P.W., 1985. Selecting a Working Fluid for a Rankine-cycle Engine. *Applied Energy*, 21, 1-42.
 18. Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2014. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 5th Ed., McGraw-Hill Education, 554-555.
 19. Li, X., Liu, T., Chen, L., 2018. Thermodynamic Performance Analysis of an Improved Two-stage Organic Rankine Cycle. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China.
 20. Cengel, Y.A., *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2th Ed., 690-694.
 21. Klein, S.A., 2003. *Engineering Equation Solver -Manual*. F-Chart Software, Box.

Nomenclature			
h	Enthalpy [kJkg ⁻¹]		
\dot{m}	mass flow rate [kgs ⁻¹]		
\dot{Q}	heat transfer rate [kW]		
C	heat capacity rate [kW°C ⁻¹]		
T	temperature [°C or K]		
\dot{W}	work [kW]		
A	surface area [m ²]		
Greek Letter			
η	efficiency		
Subscripts			
I	upper stage	th	thermal
II	lower Stage	min	minimum
p	pump	max	maximum
out	outgoing	act	actual
in	incoming	m	mechanic
r	re-evaporator	h	hot
T	turbine	c	cold

Harflerden Oluşan Genişletilmiş MNİST Veri Kümesinin Derin Öğrenme Tabanlı Tasarlanmış Sinir Ağı Modeli ile Sınıflandırılması

Mesut TOĞAÇAR*¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Elazığ

Geliş tarihi: 01.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

MNİST veri kümesi, model öğrenmesi, görüntü işleme, sınıflandırma süreçlerinin gerçekleştirilmesinde standart bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. MNİST veri kümesi içerisinde; el yazısı formatında hazırlanmış büyük harf, küçük harf ve rakam görüntülerinden oluşmaktadır. Genişletilmiş MNİST veri kümesi, MNİST veri kümesi ile aynı değerler dizisi formatında hazırlanmış daha kapsamlı ve sınıflandırma süreci daha zor bir veri seti türüdür. Günümüzde birçok alanda yapay zekâ tabanlı çalışmalar ilgi görmeye başlamıştır. Bu çalışmada, Genişletilmiş MNİST veri kümesinin eğitilmesi ve sınıflandırması amacıyla Python dilinde tasarlanmış yeni bir sinir ağı modeli önerilmektedir. Önerilen modelde, ön işlem adımı olarak veri büyütme yöntemi eğitim verileri için uygulanmıştır ve 26 harf kategorik olarak sınıflandırıldı. Sınıflandırma sürecinde genel doğruluk başarısı %94,73 olarak elde edildi. Önerdiğimiz model, el yazısı görüntülerinin sınıflandırılmasında başarılı bir analiz gerçekleştirdiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, Genişletilmiş MNIST veri kümesi, Harf sınıflandırması, Sinir ağları

Classification of Extended MNIST Dataset Consisting of Letters with Deep Learning-Based Designed Neural Network Model

Abstract

MNIST dataset is used as a standard criterion for model learning, image processing and classification processes. In the MNIST dataset; it consists of uppercase, lowercase letters and numbers in handwriting format. The expanded MNIST data set is a more comprehensive type of data set prepared in the same paradigm format as the MNIST dataset, and the classification process is more difficult. Today, artificial intelligence-based studies in many areas have started to attract attention. In this study, a new neural network model designed in Python language is proposed in order to train and classify the extended MNIST dataset. In the proposed model, data enlargement method as a preprocess step was applied for training data and 26 letters were categorically classified. The overall accuracy success achieved in the classification process was %94.73. The proposed model we are observed to perform a successful analysis in classifying handwritten images.

Keywords: Deep learning, Extended MNIST dataset, Letters classification, Neural networks

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mesut TOĞAÇAR, mtogacar@firat.edu.tr

1. GİRİŞ

Görüntü işleme, makine öğrenmesi, derin öğrenme gibi yaklaşımların başarı ölçütlerinden biri de standartlaşmış veri kümelerini kullanmasıdır. Standartlaşmış veri kümeleri farklı öğrenme yaklaşımları veya yöntemlerinden elde edilen analizleri karşılaştırmak için adil bir yol sağlar. Araştırmacılar tarafından geliştirilmiş yaklaşım veya yöntemler bu veri kümelerini kullanarak yayınladıkları makalelerde daha hızlı bir şekilde diğer araştırmacılar tarafından iç göri kazanmasına imkân sağlar [1,2]. Standartlaşmış veri kümeleri arasında bazıları şunlardır; MNİST, Coco, İmagenet, Cifar, Flicker, Cityscapes [3–5] vb. İlk standartlaşmış veri kümeleri arasında MNİST, 1998 yılında Lecun ve arkadaşları tarafından oluşturulmuştur. MNİST veri kümesi, el yazısı karakterlerden oluşan 28x8 piksel boyutuna sığdırılan gri seviyeli görüntülerden oluşmaktadır [6]. Genişletilmiş MNİST, 2017 yılında Gregory Cohen ve arkadaşları tarafından oluşturulmuştur [7]. Genişletilmiş MNİST veri kümesi, MNİST veri kümesinden daha geniş kapsamlı el yazısı görüntülerini içeren görüntülerden oluşmaktadır [8].

El yazılı harf karakterlerinden oluşan görüntüleri tanımadaki bilgisayar görmesi için klasikleşmiş bir problemdir. Yapay zekâ tabanlı birçok evrimsel sinir ağı (ESA) modeli ile harf karakteri tanıma ve sınıflandırma işleminde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile genişletilmiş MNİST veri kümesinde tasarlanan ESA modeli sınıflandırılması hedeflenmektedir. Önerilen yaklaşımın başarımını artırmak için ise eğitim verisindeki her bir görüntü büyütme tekniği ile işlenecektir. Harf karakterlerinin sınıflandırılmasında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Genişletilmiş MNİST veri kümesini kullanarak analizler gerçekleştirmiş bazı çalışmalar incelenirse; A. Amelia [9], çalışmada 26 harf görüntüsünden oluşan veri kümesini kendi tasarladığı ESA modeli ile sınıflandırmıştır. Sınıflandırma sürecinde Softmax fonksiyonunu kullanmış ve iki formatta bu süreci gerçekleştirmiştir. Birincisi, veri kümesini

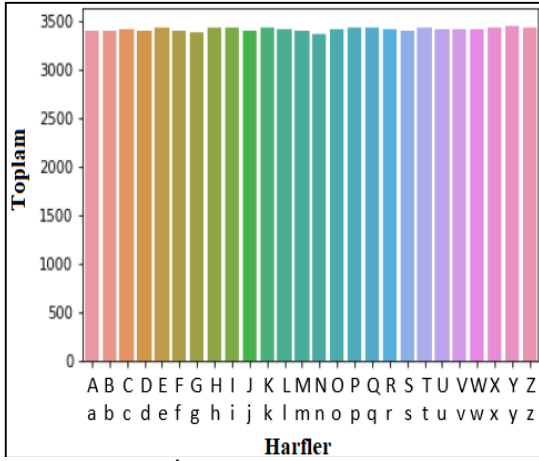
doğrudan ESA modeli ile gerçekleştirerek %92 oranında genel doğruluk başarısı elde etmiştir. İkincisi ESA modelinden çıkartılan paylaşılmış ağırlıkları kullanarak %74,29 oranında bir genel doğruluk başarısı elde etmiştir. Dawid Grzelak ve arkadaşları [10], 26 karakterli harflerden oluşan veri kümesinin sınıflandırma sürecinde, tasarladıkları ESA modelini kullanmışlar. ESA modelinde ayrıca görüntü kaydırma ve ölçekleme işlemlerini gerçekleştiren Rampa fonksiyonunu (Ramp) kullanmışlar. Onların ESA modelinin son katmanında kullandıkları Softmax fonksiyonu ile elde ettikleri genel doğruluk oranı %92,40 olmuştur. V. Jayasundara ve arkadaşları [11], 26 karakterli veri kümesini ön işlem adımlarından geçirerek iyileştirmişlerdir. Onlar, kapsül ağlarını ve kod çözücü ağları birlikte kullanarak melez bir model sunmuşlardır. Onların çalışmasında elde ettikleri genel doğruluk başarısı %92,79 olmuştur. Ruthvik Vaila ve arkadaşları [12], veri kümesini 26 harf türüne göre başarılı bir şekilde sınıflandırmışlar. Onlar, çalışmada melez bir model önermişler ve sivri sinir ağlar ile dereceli alçalma yöntemini birlikte kullanmışlar. Onların çalışmasında elde ettikleri genel doğruluk başarısı %85,35 olmuştur.

Bu makale kısaca şöyle düzenlenmiştir; veri kümesi hakkında bilgiler Bölüm 2’de verilmiştir. Ön işlem adımı (veri büyütme) ve ESA modeli hakkında bilgiler Bölüm 3’te verilmiştir. Çalışmanın deneysel analizleri ile ilgili bilgiler Bölüm 4’te verilmiştir. Tartışma ve Sonuç hakkında bilgiler sırasıyla son iki bölümde yer almıştır.

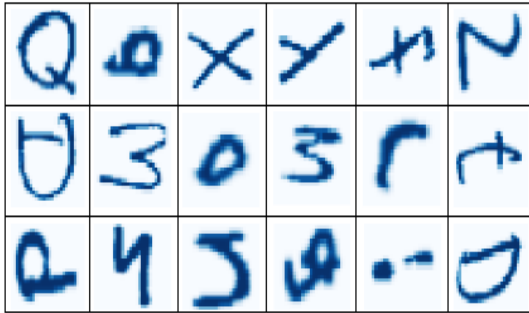
2. VERİ KÜMESİ

Genişletilmiş MNİST (GMNİST) veri kümesi, MNİST veri kümesine göre daha fazla görüntülerden oluşmuş ve zorluk derecesi artırılmış standartlaşmış bir veri kümesidir. GMNİST’teki her bir görüntü çözünürlüğünün düşük olması, rahat depolanabilir olması, erişim kolaylığı ve kullanım kolaylığı bu veri kümesini standartlaştırılmasını sağlamıştır. Bu çalışmada kullanılan GMNİST veri kümesi, küçük ve büyük

el yazısından oluşan 26 harf görüntülerinden oluşmaktadır. Her bir görüntü 28x28 piksel çözünürlüğündedir. Ek olarak, her bir görüntü 8 bit gri seviyeli çözünürlüğe sahiptir ve toplam 103,600 karakterden oluşmaktadır. Veri kümesinin; 88,800 görüntüsü eğitim verileri olarak ayrılmıştır ve 14,800 görüntüsü ise test verileri için ayrılmıştır [7]. Eğitim verilerinin harf tabanlı istatistik bilgisi Şekil 1’de gösterildi. GMNİST veri kümesinin örnek görüntülerinden oluşan alt kümesi ise Şekil 2’de gösterildi.



Şekil 1. GMNİST veri kümesinde, eğitim verileri için ayrılmış her bir harf miktarı



Şekil 2. GMNİST veri kümesinin alt kümesi örnek görünümü

Veri kümesi, Şekil 2 incelendiğinde dengeli bir dağılım gösterdi. İstatistiksel olarak veri kümesinin %30’u test verisi ve %70’i eğitim verisidir [13]. Bu çalışmanın analizinde de mevcut durum korundu.

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM

3.1. Veri Büyütme ve Optimizasyon

Birçok derin öğrenme modellerinde ve makine öğrenme yöntemlerinde veri büyütme tekniği kullanılmaktadır. Veri büyütme tekniği ile ESA modellerinin performanslarına katkı sağlanmakta ve modellerin aşırı uyumunu önlemektedir. Bu teknik sayesinde, her bir görüntünün orijinal halinden biraz değiştirilmiş formatta kopyalarının oluşturulmaktadır veya orijinal görüntüler yerine kullanılmaları amaçlanmaktadır. Böylece her bir görüntünün kalitesi artırılmış olur [14]. Veri büyütme yönteminde kullanılan parametreler vardır. Bu çalışmada veri büyütme tekniği python dilinde tasarlanmıştır ve keras kütüphanesinin “Image Data Generator” fonksiyonu kullanılarak yalnızca eğitim verilerine veri büyütme tekniği uygulandı [15]. Çalışmanın deneyinde tercih edilen önemli veri büyütme parametreleri ve önerilen yaklaşımın diğer parametre değerleri Çizelge 1’de verildi. Önerilen yaklaşımda ESA modelinin mini seri boyutu 64 tercih edildi. Mini seri boyutu sayesinde veri kümeleri alt veri kümelerine ayrılarak ESA modelleri tarafından daha rahat eğitilmesine katkıda bulunmaktadır [16]. Deneyin analizinde tercih edilen devir sayısı 50 tercih edildi ve tercih edilen optimizasyon algoritması Adam yöntemi idi.

Adam yöntemi, her partideki ağırlık parametrelerini ve öğrenme katsayılarını güncelleyen etkili bir optimizasyon yöntemidir. Modelin eğitimi sırasında Adam yöntemi, yön türevi (gradyan) değerlerini tahmin ederek ağırlık parametrelerinin öğrenme oranlarının ayarlanmasına yardımcı olur. Adam, yön türevin inişlerinde (g_t) hesaplanan üstel hareketli ortalamaları kullanır. Geçmiş yön türevi (m_t) ve geçmiş kare gradyan (V_t) ortalamaları sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’ye göre hesaplanır. Bu denklemlerde; β değişkeni hiper parametre değerlerini hesaplamak için kullanılır ve bu değişkenin değeri $0,9 < \beta < 0,999$ arasındadır. Zaman sürecini ise, t değişkeni temsil eder.

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (1)$$

$$V_t = \beta_2 V_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (2)$$

Çizelge 1. Bu çalışmada kullanılan veri büyüme tekniği ile optimizasyon yönteminin parametreleri

Önerilen veri büyüme tekniği		Optimizasyon ve parametreler	Veri büyüme parametreleri ve değerleri
Yazılım	Python	Optimizasyon= Adam Öğrenme oranı= 0,001 Gecikme=0,0 $\beta_1=0,9$ $\beta_2=0,999$	Yakınlaştırma aralığı = 0,1 Yükseklik kaydırma aralığı = 0,1 Genişlik kaydırma aralığı = 0,1 Döndürme sınırı = 10°
Kütüphane	Keras		
Mini seri boyutu	64		
Devir sayısı	50		
Kayıp türü	Kategorik çapraz entropi		

3.2. Önerilen Model

Önerilen yaklaşımda kullanılan ESA modeli python yazılımında tasarlanmış ve GMNİST veri kümesine uyarlanmış özgün bir modeldir. Model genel yapısıyla; evrişimsel katmanlar, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlardan oluşmaktadır [17]. Evrişimsel katman, girdi görüntüsü üzerinde filtre çerçevesini dolaştırarak hem görüntü boyutunu azaltır hem de bir sonraki katmana görüntü özelliklerinin yer aldığı aktivasyon haritalarını aktarır. Havuzlama katmanı, girdi boyutunun azaltılmasını sağlar ve bu durum derinlik boyutunu etkilemez. Tam bağlantılı katman / yoğunluk katman, modelin sınıflandırma sürecinde kullanılan fonksiyonuna tüm girdi değerlerini katarak değerler üretilmesini sağlar. Genelde tam bağlantılı katmanlar ESA modellerinin son katmanlarında tercih edilmektedir [18]. Bu çalışmada tam bağlantılı katmanın işlevini yerine getirecek yoğunluk katmanı (Dense layer) kullanıldı.

Önerilen modelde kullanılan diğer fonksiyonlar ise; Softmax, Sızdıran ReLU, DropOut. Softmax yöntemi, sınıflandırma işlemi gerçekleştirmek için genelde ESA modelleri tarafından en son katmanda tercih edilen bir yöntemdir [19]. Softmax, bir önceki yoğunluk/ tam bağlantılı katmandan gelen girdi değerlerini işleyerek olasılık değerleri üretilmesini sağlar. Böylece, modelin girdi görüntüsü olasılık değeri en yüksek olan sınıfa aktarılır [20]. Sızdıran ReLU fonksiyonu, pozitif girdi değerlerini işleyerek pozitif yeni bir çıktı değeri üretilmesini sağlar; aynı zamanda negatif girdi değerlerini işleyerek, negatif yeni bir çıktı değeri üretilmesine engel olur. Negatif bir çıktı değeri üretmeden sıfır değerine

yakın pozitif bir değer üretilmesini sağlar [21]. DropOut fonksiyonu, aşırı uyumun önüne geçebilmek için girdi değerlerini seyrelterek çıkışa aktarır [22]. Bu çalışmada kullanılan ESA modelinin genel tasarımı Şekil 3'te gösterildi. Önerilen modelin tasarım detayları ise Çizelge 2'de verildi.



Şekil 3. Önerilen modelin genel tasarımı

Çizelge 2. Önerilen modelin genel tasarımı ve parametre değerleri

Katman /fonksiyon	Filtre	Parametre/Değer	Adım boyutu	Çıkış boyutu
Evrişimsel	32	-	5 × 5	28 × 28
Sızdıran ReLU	-	Alfa= 0,02	-	-
Maksimum havuzlama	-	-	2 × 2	-
DropOut	-	0,2	-	-
Evrişimsel	196	-	5 × 5	-
Sızdıran ReLU	-	Alfa= 0,02	-	-
Maksimum havuzlama	-	-	2 × 2	-
DropOut	-	0,2	-	-
Maksimum havuzlama	-	-	2 × 2	-
Yoğunluk	1024	-	-	-
Sızdıran ReLU	-	Alfa= 0,02	-	-
DropOut	-	0,25	-	-
Yoğunluk	128	ReLU	-	-
DropOut	-	0,25	-	-
Yoğunluk	-	-	-	26
Softmax				Sınıf sayısı: 26

4. BULGULAR

Bu çalışmada kullanılan veri büyütme yöntemi ve önerilen model Python 3.6 yazılım dilinde tasarlanmıştır. Yazılımın derlenmesinde Jupyter Notebook ara yüzü kullanıldı. Deneyin analizi için kullanılan donanım özellikleri şu şekildedir; işlemci Intel © Xeon © Gold 6132 CPU @ 2,6 GHz, grafik kartı NVIDIA Quadro P6000 24 GB, bellek kartı 64 GB ve 64 bitlik Windows 10 işletim sistemi kullanıldı. Bu çalışmanın geçerliliğinin ölçülmesi sürecinde karmaşıklık matrisi tercih edildi. Karmaşıklık matrisinin metrikleri; duyarlılık, özgüllük, hassasiyet, f-skör ve doğruluktur. Karmaşıklık matrisindeki metrik değerlerinin hesaplanmasında aşağıda belirtilen denklemler (Eşitlik 3-7) kullanılmaktadır. Bu denklemlerde kullanılan değişkenler; doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP), yanlış negatif (YN) anlamına gelmektedir [23,24].

$$\text{Duyarlılık (Duy)} = \frac{(DP)}{(DP+YN)} \quad (3)$$

$$\text{Özgüllük (Özg)} = \frac{(DN)}{(DN+YP)} \quad (4)$$

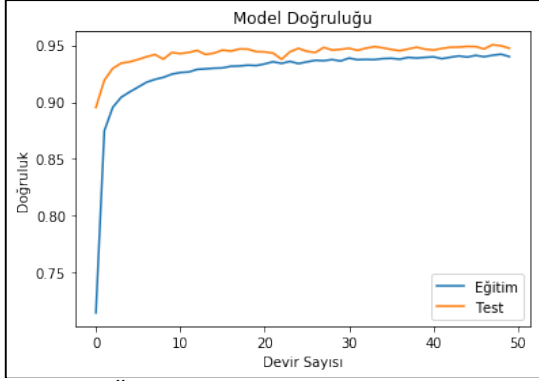
$$\text{Hassasiyet (Has)} = \frac{(DN)}{(DN+YP)} \quad (5)$$

$$\text{F-skör (f-skr)} = \frac{(2 \times DP)}{(2 \times DP + YP + YN)} \quad (6)$$

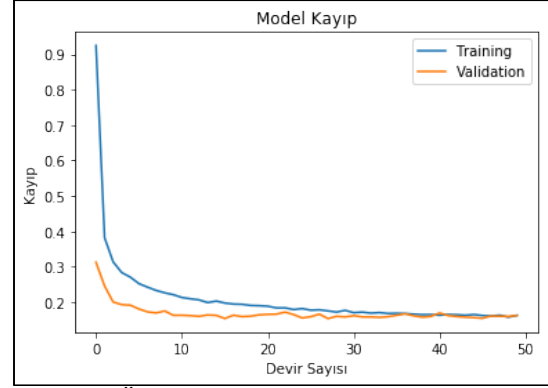
$$\text{Doğruluk (Dğr)} = \frac{(DP+DN)}{(DP+YN)+(YP+DN)} \quad (7)$$

Çalışmanın deneysel analizinde veri kümesi görüntüleri “csv” uzantılı dosya formatına dönüştürüldü. Ardından, eğitim verileri ve test verileri girdi olarak önerilen yaklaşıma verildi. Eğitimde tercih edilen devir sayısı 50’ydi. Analizler sonucunda, elde edilen genel doğruluk başarıları %94,73 ve genel kayıp oranı ise %16,23’tü. Modelin her bir devir sayısı ortalama 57 saniye sürdü. Tüm devir sayısı dikkate alındığında ortalama geçen süre 2850 saniyeydi. Önerilen yaklaşımda elde edilen genel doğruluk grafiği Şekil 4’te gösterildi ve genel kayıp grafiği Şekil 5’te gösterildi. Ek olarak, analiz sonucunda elde edilen karmaşıklık matris tablosu Şekil 6’ta gösterildi ve bu karmaşıklık matrisi tablosundan elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3’te verildi. Analiz sonuçları incelendiğinde en iyi sınıf başarıları %99,90 oranında “S, s - Z, z” harflerinde elde edildi ve en kötü sınıf başarıları ise %97,98 oranında “I, i” harfinden elde edildi.

Harflerden Oluşan Genişletilmiş MNİST Veri Kümesinin Derin Öğrenme Tabanlı Tasarlanmış Sinir Ağı Modeli ile Sınıflandırılması



Şekil 4. Önerilen yaklaşımın eğitim ve test doğruluk başarıları grafiği



Şekil 5. Önerilen yaklaşımın eğitim ve test doğruluk kayıp grafiği

Çizelge 3. Deneysel analizden elde edilen sonuçlar (%)

Veri kümesi	Sınıf	Duy.	Özg.	Has.	f-skr	Dğr.	Genel dğr.
GMNİST	A, a	95,62	99,88	97,29	96,45	99,70	94,73
	B, b	97,74	99,89	97,54	97,64	99,81	
	C, c	96,81	99,92	98,08	97,44	99,79	
	D, d	98,19	99,74	94,42	96,27	99,68	
	E, e	98,15	99,87	97,11	97,63	99,80	
	F, f	97,71	99,91	97,91	97,81	99,82	
	G, g	82,93	99,73	92,87	87,62	99,04	
	H, h	97,01	99,88	97,38	97,20	99,77	
	I, i	64,46	99,38	81,27	71,90	97,98	
	J, j	95,17	99,84	96,21	95,69	99,65	
	K, k	97,78	99,95	98,77	98,27	99,86	
	L, l	86,67	98,47	70,12	77,52	98,00	
	M, m	98,78	99,90	97,59	98,18	99,85	
	N, n	96,04	99,87	97,00	96,52	99,72	
	O, o	95,84	99,95	98,85	97,32	99,79	
	P, p	98,30	99,94	98,68	98,49	99,87	
	Q, q	93,84	99,28	84,85	89,12	99,06	
	R, r	95,20	99,90	97,59	96,38	99,71	
	S, s	98,30	99,96	99,19	98,74	99,90	
	T, t	97,41	99,88	97,32	97,36	99,78	
	U, u	92,48	99,82	95,75	94,08	99,53	
V, v	96,41	99,59	91,02	93,64	99,46		
W, w	99,30	99,87	97,09	98,18	99,85		
X, x	98,20	99,89	97,65	97,92	99,82		
Y, y	96,62	99,86	96,71	96,67	99,73		
Z, z	98,20	99,97	99,42	98,80	99,90		

Karmaşıklık Matrisi

0	1006	1	1	2	0	0	3	1	0	0	1	0	1	1	2	0	21	2	0	1	3	0	4	1	1	0
1	1	995	0	2	1	0	1	4	0	1	0	5	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0	3	0	0	0
2	0	0	974	1	14	0	2	0	0	0	0	7	0	1	1	0	2	1	0	2	1	0	0	0	0	0
3	1	3	0	1033	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	9	0	1011	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	0	0	2	2	985	1	1	0	2	0	1	0	0	0	2	1	0	2	8	0	0	0	1	0	0
6	8	11	2	3	3	0	860	3	0	2	0	0	0	1	0	0	136	1	2	1	0	0	0	0	4	0
7	2	0	0	0	0	0	1007	0	0	2	5	1	13	0	0	0	1	0	1	2	1	1	2	0	0	0
8	0	0	0	1	1	0	0	1	664	14	0	346	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
9	0	2	0	3	0	1	3	1	19	966	0	3	0	0	0	0	1	0	3	3	3	5	1	0	1	0
10	0	2	0	0	0	1	0	4	0	0	969	2	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	2	6	1	0
11	0	0	3	1	0	0	1	1	126	3	0	885	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	973	2	0	0	0	0	0	0	0	3	1	3	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	16	972	0	1	0	6	0	0	0	0	8	1	1	1
14	1	1	0	32	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	946	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0
15	0	1	0	8	0	2	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1047	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
16	7	0	0	1	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	2	2	975	1	1	0	1	1	0	0	1	0
17	0	0	1	2	5	1	0	1	1	1	6	2	0	6	0	0	1	972	0	2	0	14	0	1	5	0
18	2	1	1	1	1	0	6	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	987	0	0	0	1	0	0	0
19	0	0	0	0	2	10	0	2	2	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1017	0	0	0	2	3	1	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	947	64	6	0	2	0
21	0	1	0	1	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	0	0	4	0	0	18	994	0	0	7	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	2	0	1002	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	1	2	0	0	0	0	2	0	2	1	1039	5	1	0
24	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	1	1	2	0	4	3	9	0	9	973	0
25	2	1	2	0	0	1	0	0	3	2	0	0	1	0	0	0	3	0	0	1	0	1	0	1	1	1037
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	

Şekil 6. Bu çalışmanın analizinde elde edilmiş karmaşıklık matrisi

5. TARTIŞMA

GMNİST veri kümesini oluşturan harfleri sınıflandırmak oldukça zor bir süreçtir. Çünkü MNİST veri kümesine göre veriler artırılmış ve anlaşılması zor el yazısı imgeleri veri kümesine eklenmiştir. Bu tür standart veri kümeleri

tasarlanmış ESA modellerinin başarılarını ölçmek için ilk etapta kullanılmaktadır. Böylece aynı veri kümesini kullanan diğer ESA modelleri ile performans karşılaştırılması yapılabilecektir. Önerilen yaklaşımdaki başarı ön işlem adımı olarak gerçekleştirdiğimiz ve eğitim verilerine uyguladığımız veri büyütme yöntemine bağlıdır.

Diğer yönüyle önerilen modelimde kullandığım katman ve bu katmanlara bağlı parametre değerleri de başarılı bir sonuç almamı sağladı. Önerilen yaklaşımın eksik olarak görebileceğim yönü ise ön işlem adımlarının çeşitliliğini artırabilirdim. Örneğin; veri büyütme yöntemi ile

beraber, görüntü imgelerinde bölgesel odaklanma ve piksel artırma yöntemleri de denenebilirdi. GMNİST (26 sınıflı) veri kümesini kullanarak analizler gerçekleştirildi ve literatürde yer alan çalışmalar Çizelge 4’te verildi.

Çizelge 4. Aynı veri kümesini kullanan çalışmaların sonuçları

Makale	Yıl	Model/Yöntem	Genel dğr. (%)
A. Amelia [9]	2018	ESA	92
Dawid Grzelak ve arkadaşları [10]	2019	ESA + Rampa	92,40
V. Jayasundara ve arkadaşları [11]	2019	Kapsül ağ + Kod çözücü	92,79
Ruthvik Vaila ve arkadaşları [12]	2020	Sivri ağ + Dereceli alçalma	85,35
Önerilen yaklaşım	2021	ESA + Veri büyütme	94,73

A. Amelia [9] çalışmasında, yalnızca ESA modeli kullandı. O, ESA modeli ile birlikte bir ön işlem adımı veri kümesine uygulaması önerdiği yaklaşımın başarımını artırabilirdi. Dawid Grzelak ve arkadaşları [10], ESA modeli birlikte bir ön işlem adımı her bir evrimsel katmandan sonra (Rampa) uygulamışlardır. Bu yöntemin model içerisinde uygulanmaktansa, model eğitiminden önce görüntü verisine uygulanması daha verimli olacaktır. V. Jayasundara ve arkadaşları [11], farklı bir ESA mimarisi olan Kapsül ağlar ile birlikte otomatik kod çözücü yöntemini birlikte kullanmışlardır. Onlar çalışmasında, ön işlem adımı olarak veri büyütme yöntemini de kullanmışlardır. Ruthvik Vaila ve arkadaşları [12], ESA modellerinden farklı bir mimari yapıda olan Sivri ağları veri kümesinin eğitiminde kullanmışlar. Fakat onların kullandığı sivri ağlar, sınıflandırma performansında çok fazla katkı sunmamıştır. Onlar ESA modeli üzerinde analizlerini gerçekleştirdiler, sınıflandırma performansları %85,35’in üzerine çıkarabilirlerdi. Sonuç olarak önerilen yaklaşım, Çizelge 4’te belirtilen diğer çalışmalara göre daha iyi sonuç vermiştir.

6. SONUÇ

Standartlaşmış veri kümelerinde ESA modellerinin başarı ölçütlerinin değerlendirilmesi, modellerin geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Bu çalışmada standartlaşmış veri kümesi olan GMNİST kullanılmıştır ve 26 sınıftan

oluşan harf görüntüleri sınıflandırılmıştır. Sınıf kümelerinde küçük ve büyük el yazısı harflerin bulunması sınıflandırma sürecini daha da zor hale getirmiştir. Ancak, önerilen yaklaşım ile elde edilen genel doğruluk oranı %94,73’tü. Bu çalışma ile el yazısı karakterlerinin sınıflandırılmasında önerilen yaklaşımın başarılı bir şekilde sonuç aldığı gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda rakamlar, özel karakterler, harflerden oluşan standartlaşmış veri kümeleri üzerinde analizler yapılması düşünülmektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın performans artışını sağlamak için çeşitli ön işlem adımları ile yeniden tasarlanması planlanmaktadır.

7. KAYNAKLAR

1. Lundervold, A.S., Lundervold, A., 2019. An Overview of Deep Learning in Medical Imaging Focusing on MRI. *Z Med Phys.* 29(2), 102–127. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2018.11.002>.
2. AlQuraishi, M., 2019. ProteinNet: a Standardized Data Set for Machine Learning of Protein Structure. *BMC Bioinformatics*, 20, 311. <https://doi.org/10.1186/s12859-019-2932-0>.
3. Zhang, J.M., Harman, M., Ma, L., Liu, Y., 2020. Machine Learning Testing: Survey, Landscapes and Horizons. *IEEE Trans Softw Eng.* 99, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tse.2019.2962027>.
4. Studer, L., Alberti, M., Pondenkandath, V.,

- Goktepe, P., Kolonko, T., Fischer, A., Liwicki, M., Ingold, R., 2019. A Comprehensive Study of Imagenet Pre-training for Historical Document Image Analysis. Proc Int Conf Doc Anal Recognition, ICDAR. 720–725. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2019.00120>.
5. Wei, Z., Wang, F., 2019. Adaptive Cascade Single-shot Detector on Wireless Sensor Networks. EURASIP J Wirel Commun Netw. 150. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1440-2>.
 6. Lecun, Y., MNIST handwritten digit database, Corinna Cortes and Chris Burges. <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>. Erişim tarihi: 7 Haziran 2021.
 7. Cohen, G., Afshar, S., Tapson, J., Van Schaik, A., 2017. EMNIST: Extending MNIST to Handwritten Letters. Proc Int Jt Conf Neural Networks 2017-May:2921–2926. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2017.7966217>
 8. Jiang W., 2020. MNIST-MIX: A Multi-Language Handwritten Digit Recognition Dataset. IOP SciNotes 1:025002. <https://doi.org/10.1088/2633-1357/abad0e>
 9. Amelia, A., 2018. Convolution Neural Network to Solve Letter Recognition Problem.
 10. Grzelak, D., Podlaski, K., Wiatrowski, G., 2019. Analyze the Effectiveness of an Algorithm for Identifying Polish Characters in Handwriting Based on Neural Machine Learning Technologies. J King Saud Univ-Comput Inf. Sci. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.08.001>.
 11. Jayasundara V., Jayasekara S., Jayasekara, H., Jayasekara, H., Rajasegaran, J., Seneviratne, S., Rodrigo, R., 2019. TextCaps: Handwritten Character Recognition with Very Small Datasets. In: 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 254–262.
 12. Vaila, R., Chiasson, J., Saxena, V., 2020. A Deep Unsupervised Feature Learning Spiking Neural Network with Binarized Classification Layers for EMNIST Classification using Spyke Flow. 2002.11843.
 13. Crawford C., 2017. Extended MNIST Letter Dataset. In: Kaggle. <https://www.kaggle.com/crawford/emnist>. Erişim tarihi: 7 Haziran 2021.
 14. Shorten, C., Khoshgoftaar, T.M., 2019. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. J Big Data. 6, 60. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.
 15. Image Data Augmentation. In: Keras Blog. <https://keras.io/api/preprocessing/image/>. Erişim tarihi: 6 Haziran 2021
 16. Dokuz, Y., Tufekci, Z., 2021. Mini-batch Sample Selection Strategies for Deep Learning Based Speech Recognition. Appl Acoust 171:107573. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107573>.
 17. Gadekallu, T.R., Khare, N., Bhattacharya, S., Singh, S., Maddikunta, P.K.R., Srivastava, G., 2020. Deep Neural Networks to Predict Diabetic Retinopathy. J Ambient Intell Humaniz Comput. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01963-7>.
 18. Suárez-Paniagua, V., Segura-Bedmar, I., 2018. Evaluation of Pooling Operations in Convolutional Architectures for Drug-drug Interaction Extraction. BMC Bioinformatics 19(S8), 209. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2195-1>.
 19. Lu, J., Ye, Y., Xu, X., Li, Q., 2019. Application Research of Convolution Neural Network in Image Classification of Icing Monitoring in Power Grid. EURASIP J Image Video Process. 49, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13640-019-0439-2>.
 20. Luo, Y., Wong, Y., Kankanhalli, M., Zhao, Q., 2020. Softmax: Improving Intra-class Compactness and Inter-class Separability of Features. IEEE Trans Neural Networks Learn Syst. 31, 685–699. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2019.2909737>
 21. Zhang, X., Zou, Y., Shi, W., 2017. Dilated Convolution Neural Network with LeakyReLU for Environmental Sound Classification. In: 2017 22nd International Conference on Digital Signal Processing (DSP). 1–5.
 22. Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R., 2014. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. J Mach Learn Res 15(1), 1929-1958
 23. Toğaçar, M., Ergen, B., Sertkaya, M.E., 2019. Zatiürre Hastalığının Derin Öğrenme Modeli ile

- Tespiti. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi, 31(1), 223–230.
24. Sertkaya, M.E., Ergen, B., Togacar, M., 2019. Diagnosis of Eye Retinal Diseases Based on Convolutional Neural Networks Using Optical Coherence Images. In: 2019 23rd International Conference Electronics. 1–5.

Molibden ve Vanadyum İlavesinin Fe-Cr-C Sert Dolgu Alaşımlarının Aşınma Direncine Etkisi

Nilay ÇÖMEZ*¹, Canser GÜL¹, Hülya DURMUŞ¹

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa

Geliş tarihi: 18.05.2021 Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Sert dolgu kaplamalar, pek çok mühendislik uygulamasında iş parçalarının aşınma ve korozyon direncini artırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmanın amacı, karbür yapıcı elementlerden molibden ve vanadyumun Fe-Cr-C esaslı sert dolgu alaşımlarına ilave edilerek mikroyapı ve aşınma özelliklerinde meydana gelecek değişimleri incelemektir. Her kaplama hem vanadyum hem de molibden içermektedir. Fe-Cr-C alaşımlarına %3, %4 oranlarında ferromolibden, %10, %12 oranlarında ferrovanadyum ilave edilmiştir. Kaplama içeriğinin primer M_7C_3 (M: Fe, Cr) ve M_2C (M: Mo, Fe, Cr) karbürlerinden ve matrise yayılmış ince taneli sekonder karbürlerden oluştuğu gözlenmiştir. Artan ferromolibden ve ferrovanadyum ilavesinin karbür tane boyutunu küçülttüğü tespit edilmiştir. Bununla birlikte hacimsel karbür oranı ve sertlik artış eğilimi sergilemiştir. En yüksek sertlik ve buna bağlı olarak en düşük hacimsel aşınma kaybı %4 ferromolibden +%10 ferrovanadyum ilave edilen kaplamada tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaplama, Sert dolgu, Seyrelme, Aşınma, Sertlik, Karbür

The Effect of Molybdenum and Vanadium on Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys

Abstract

Hardfacing coatings are one of the methods used in many engineering applications to increase the wear and corrosion resistance of workpieces. This study aims to examine the changes in microstructure and wear properties by adding carbide forming elements of molybdenum and vanadium together to Fe-Cr-C-based hardfacing alloys. Each coating contains both vanadium and molybdenum. 3%, 4% ferromolybdenum, and 10%, 12% ferrovanadium were added to the Fe-Cr-C alloys. It was observed that the microstructure of coatings consists of primary M_7C_3 (M: Fe, Cr) and M_2C (M: Mo, Fe, Cr) carbides and fine-grained secondary carbides dispersed in the matrix. It was observed that increasing ferromolybdenum and ferrovanadium addition reduces the carbide grain size. However, the volumetric carbide ratio and hardness showed an increasing trend with increasing ferrovanadium and ferromolybdenum. The highest hardness and consequently the lowest volumetric wear loss was determined in the coating including 4% ferromolybdenum + 10% ferrovanadium.

Keywords: Coating, Hardfacing, Dilution, Wear, Hardness, Carbide

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Nilay ÇÖMEZ, nilay.comez@cbu.edu.tr

1. GİRİŞ

Bir bileşenin amaçlanan işlevini yerine getirmediğinde parçanın hasara uğradığı söylenir. Mühendislik bileşenlerinde hasar temel olarak dört farklı şekilde gözlenir: kırılma, korozyon, aşınma ve deformasyon. Aşınma, toplam hasarların % 55'ini oluşturur. Bu oran, aşınmanın azaltılmasına yönelik çalışmaların ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır [1]. Yüzey kaplamaları, mühendislik uygulamalarında yer alan iş parçalarının ömrünü uzatmada oldukça etkili bir yaklaşımdır [2].

Sert dolgu, bir dolgu metalinin ana metal üzerine biriktirildiği yüzey kaplama türü olarak tanımlanır [3]. Sert dolgu kaplamalar, gaz tungsten ark kaynağı [4], gaz metal ark kaynağı, tozaltı ark kaynağı, özlü telle ark kaynağı, plazma ark kaynağı ve lazer kaynağı gibi yöntemlerle metalik yüzeylere uygulanabilmektedir [5]. Özellikle uygun maliyetli Fe-Cr-C sert dolgu kaplamaları, başta tarım, şeker üretimi ve madencilik gibi aşınmanın ön planda olduğu endüstriyel uygulamalarda aşınma ve korozyon direncini geliştiren bir yöntemdir [1,2]. Krom haricinde molibden, titanyum, tungsten, vanadyum ve niyobyum gibi karbür yapıcı elementler Fe-Cr-C alaşımlarına ilave edilerek yüksek sertlikte fazların çökmesiyle ve matris fazının özelliklerinin optimize edilmesiyle aşınma direncine katkı sağlanmaktadır [1].

Qi ve arkadaşları, [6] sadece vanadyumu farklı oranlarda Fe-Cr-C alaşımına ilave ederek, vanadyum katkısının sert dolgu kaplamaların aşınma direncini artırdığını tespit etmişlerdir. Dilawary ve arkadaşları, [7] ise plazma transfer ark yöntemi ile 4140 çeliğinin yüzeyini sadece M2 yüksek hız çeliği ile ve molibdenle alaşımlandırılmış M2 yüksek hız çeliği ile kaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda molibden ilavesi sertliği düşürse de aşınma direncini artırmıştır. Wang ve arkadaşları, [8] Fe-Cr-C sert dolgu alaşımına ferrotitanyum, ferrovanadyum ve ferromolibden ilave ederek oluşan Fe-Cr-C-Ti-V-

Mo alaşımından kaplamanın aşınma özelliklerini, ticari bir telle üretilen sert dolgu kaplaması ile kıyaslamalı olarak değerlendirmişlerdir. Lin ve arkadaşları, [9] vanadyum, molibden ve nikeli Fe-Cr-C alaşımına ayrı ayrı ekleyerek her bir alaşım elementinin kaplamanın mikroyapısına, sertliğine ve kırılma tokluğuna etkisini araştırmışlardır.

Literatürden edinilen bilgiler doğrultusunda, vanadyum ve molibdenin aynı anda ilave edildiği Fe-Cr-C sert dolgu alaşımları ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu kanısına varılmıştır. Bu çalışmanın amacı, molibden ve vanadyum ilavesiyle Fe-Cr-C-V-Mo sert dolgu kaplamaları oluşturmak ve farklı oranlarda gerçekleştirilen element ilavesinin sert dolgu alaşımlarının mikroyapısına, sertliğine ve aşınma direncine etkisini incelemektir.

2. YÖNTEM

2.1. Sert Dolgu Kaplamaların Üretimi

Bu çalışmada 5 mm kalınlığındaki St-37 çelik yüzeyine tek paso demir esaslı sert dolgu alaşımları kaplanmıştır (Şekil 1). Masif kaynak telinin ve ferro alaşımların kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir. Karbür yapıcı element olarak krom, vanadyum ve molibden elementlerinin ferro alaşımlarından oluşan tozlar Çizelge 2'de verilen oranlarda karıştırılarak kaynak esnasında ergiyen masif tele takviye edilmiştir. Masif telin oluşturduğu arkın kaynak bölgesinde meydana getirdiği sıcaklık artışı ile debisi ayarlanabilen bir sistemle kaynak bölgesine takviye edilen toz karışımları ergitilerek kaplama alaşımlandırılmıştır. Kaplamayı oluşturan masif tel ve toz karışımının oranı sırasıyla %70 ve %30 olarak ayarlanmıştır. Kaplamalar korumasız metal ark kaynağı ile üretilmiştir (Çizelge 3). Herhangi bir koruyucu gaz kullanılmamıştır ve kaplama uygulamasından önce altlık malzemeye ön ısıtma uygulanmamıştır. Kaplamalar kaynak sonrası hava ortamında soğumaya bırakılmıştır.

Çizelge 1. Masif kaynak telinin ve ferro alaşımların kimyasal içeriği (ağ. %)

Element	Masif tel	FeV	FeMo	FeCr
V	-	57,5	-	-
C	0,08	0,1	0,047	7,27
Si	0,8	1,5	-	0,516
S	-	0,017	0,043	0,061
Mo	-	-	69,5	-
P	-	-	-	0,01
Cr	-	-	-	67,84
Mn	1,45	-	-	-
Fe	Kalan			

Çizelge 2. Toz karışımları (ağ. %)

Kaplama	FeCr	FeV	FeMo
3FeMo-10FeV	87	10	3
3FeMo-12FeV	85	12	3
4FeMo-10FeV	86	10	4
4FeMo-12FeV	84	12	4

Çizelge 3. Kaynak parametreleri

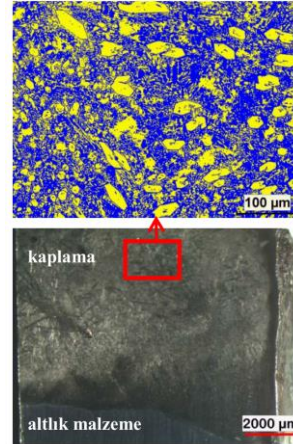
Gerilim (V)	28-30
Akım (A)	350
Kaynak ilerleme hızı (mm/dak)	140
Osilasyon genişliği (mm)	40
Tel sürme hızı (mm/dak)	170
Toz debisi (g/dak)	145
Serbest tel boyu (mm)	20-25

**Şekil 1.** 3FeMo-12FeV kaplamasının makro görüntüsü

2.2. Metalografik Hazırlık

Kaplamaların mikroyapı incelemeleri için yapılan metalografik hazırlık işlemleri sırasıyla: kesme, bakalite alma, zımparalama-parlatma ve dağlama şeklindedir. Uygun boyutlarda kesilen mikroyapı numunelerinin yüzeyleri zımparalama ve parlatma işlemi ile optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerine uygun hale getirilmiştir. SEM incelemeleri için dağlama işlemi uygulanmamıştır. Bununla birlikte optik mikroskop incelemelerinde fazlar arasındaki

kontrastı oluşturabilmek için Kalling's çözeltisi ile dağlama gerçekleştirilmiştir. Kalling's çözeltisi, "33 ml H₂O, 1,5 gram CuCl₂, 33 ml metil alkol ve 33 ml HCl" kullanılarak hazırlanmıştır. Optik mikroskopta altlık malzemesi-kaplama ara yüzeyinde seyrelmenin mikroyapıya etkisi ve kaplamanın genelinde de karbür morfolojisi incelenmiştir. Ayrıca hacimsel karbür oranı Clemex yazılımıyla tespit edilmiştir (Şekil 2). Kaplamaların hacimsel karbür oranı, Şekil 2'de stereo mikroskop görüntüsü verilen 4FeMo-12FeV kaplaması üzerinde işaret edildiği gibi üst yüzeye yakın bölgelerde hesaplanmıştır. SEM-EDX (Enerji Yayılımlı X-Işını) analizi ile kaplamalarda oluşan fazların kimyasal içeriği belirlenmiştir. Ayrıca, Fe-Cr-C-Mo-V alaşımında oluşan karbür türlerinin tespit edilmesi için 30-90° aralığında XRD taraması gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 2.** 4FeMo-12FeV numunesinin faz analizi (sarı: karbür, mavi: matris)

2.3. Sertlik Testi ve Aşınma Testi

Kaplamalara Vickers uç kullanılarak EMCO Test DuraVision marka cihazda makro sertlik testi uygulanmıştır. Makro sertlik testinde HV10 metodunda göre 98,07 N ana yük 10 saniye boyunca uygulanmıştır. Sertlik ölçümü kaplamanın üst yüzeyinde yapılmıştır ve her kaplama numunesinden 3 ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

Kaplamaların aşınma testi "ball-on-disc" metoduna

göre aşınma koşulu sağlayan CSM Tribometer cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Karşı eleman olarak 6 mm çapında alümina bilya tercih edilmiştir. Aşınma test parametreleri Çizelge 4’te verilmiştir. Aşınma sonrası Mitutoyo pürüzlülük ölçüm cihazı ile aşınma izinin profili elde edilmiştir. Profilometre cihazından dijital olarak elde edilen veriler Origin Pro yazılımına aktarılarak aşınma profilinin kesit alanı belirlenmiştir ve hacimsel aşınma kaybı hesaplanmıştır.



Şekil 3. CSM Tribometer aşınma cihazı

Çizelge 4. Aşınma test parametreleri

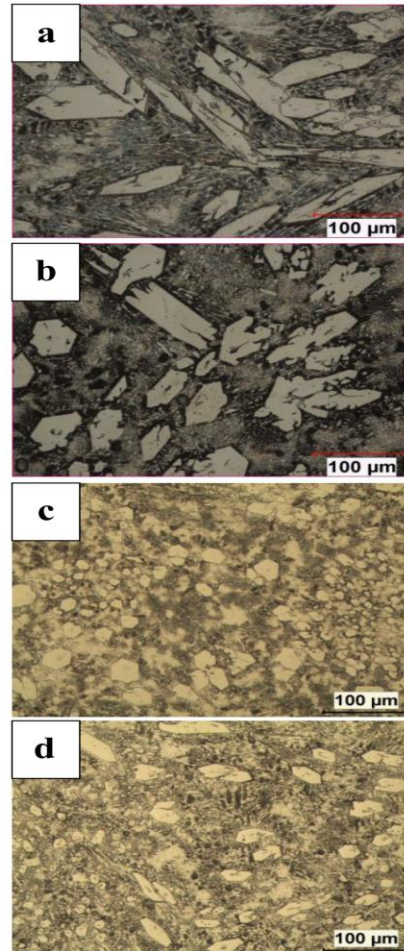
Aşınma yarıçapı	4 mm
Aşınma hızı	10 cm/s
Yük	10 N
Aşınma mesafesi	1500

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

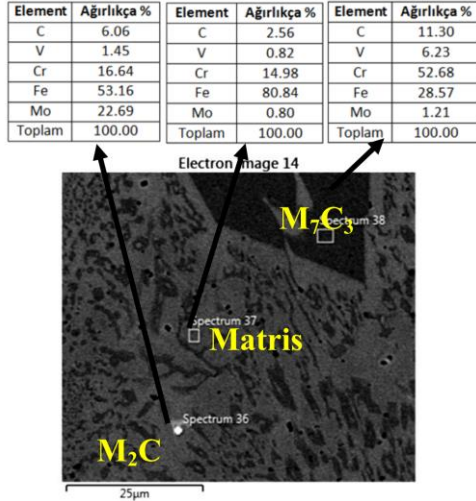
3.1. Mikroyapı

Molibden ve vanadyum içeren Fe-Cr-C sert dolgu alaşımlarının mikroyapıları Şekil 4’te verilmiştir. Tüm kaplamalarda altıgen kesite sahip çubuksu primer karbürlerin oluştuğu gözlenmiştir. Yapılan SEM-EDX (Şekil 5) ve XRD (Şekil 6) analizleriyle bu karbürlerin M_7C_3 (M: Fe,Cr) türüne ait olduğu belirlenmiştir. Kaplamalarda az miktarda $M_{23}C_6$ karbürünün oluşumu da XRD analizleriyle tespit edilmiştir. Ayrıca ince çökelti halinde ikincil karbürlerin matris fazına yayıldığı görülmüştür. Şekil 7’de altlık malzemesi ve kaplama malzemesinin ara yüzeyine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Altlık malzemesinin oda sıcaklığında olması sebebiyle, ergiyik kaplama malzemesi ve altlık malzeme arasında yüksek bir sıcaklık gradyanı meydana gelmektedir. Sıcaklık gradyanının yüksek olması,

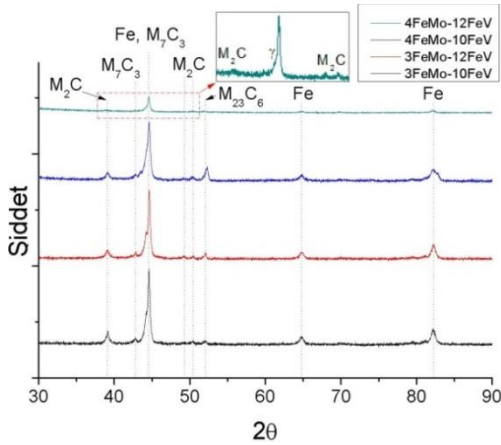
katılaştırıcı kaplama malzemesinin düzlemsel büyüme sergilemesine sebep olmuştur. Deng ve arkadaşları, [10] seyrelme bölgesinde, yüksek sıcaklık gradyanı ve katı-ergiyik arayüzü boyunca gerçekleşen küçük yapısal aşırı soğumanın bir sonucu olarak arayüzün yakınında düzlemsel bir büyüme paterni gözlemlenebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca, 4FeMo-10FeV ve 4FeMo-12FeV kaplamalarının ara yüzeyinde yüksek soğuma hızına bağlı olarak martenzit oluşumu gözlenmiştir. Her iki kaplama da düzlemsel büyüme bölgesinden sonra dendritik katılaşmaya devam etmiştir.



Şekil 4. Kaplamaların üst yüzeyine ait optik mikroskop görüntüleri: a) 3FeMo-10FeV, b) 3FeMo-12FeV, c) 4FeMo-10FeV, d) 4FeMo-12FeV

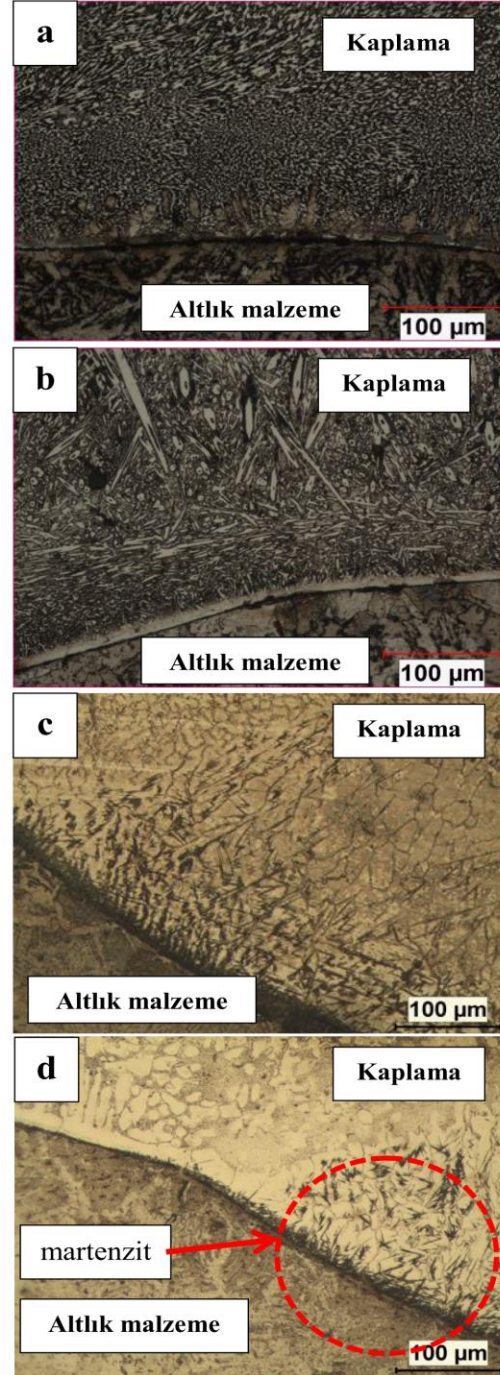


Şekil 5. 4FeMo-10FeV kaplamasının SEM-EDX analizi



Şekil 6. Kaplamaların XRD analizi

Sert dolgu kaplamalarda sıklıkla karşılaşılan durumlardan biri seyrelmedir. Kaplama ve altlık arasında iyi bir metalurjik bağın elde edilmesi için minimum seyrelme gereklidir. Aşırı seyrelme, optimize edilmiş kimyasal bileşimin ve kaplamanın homojen özelliklerinin korunmasını olumsuz olarak etkiler. Seyrelme, kaplamadaki alaşım elementlerinin altlık malzemesine doğru difüzyonuna ve kaplamada biriken ergimiş altlık malzemesinin miktarında bağlıdır [11]. Başka bir ifade ile seyrelme, altlık malzemesinde meydana gelen ergime alanının toplam ergimiş alana oranı olarak tanımlanır [12].



Şekil 7. Kaplama/altlık malzeme ara yüzeyi: a) 3FeMo-10FeV, b) 3FeMo-12FeV, c) 4FeMo-10FeV, d) 4FeMo-12FeV

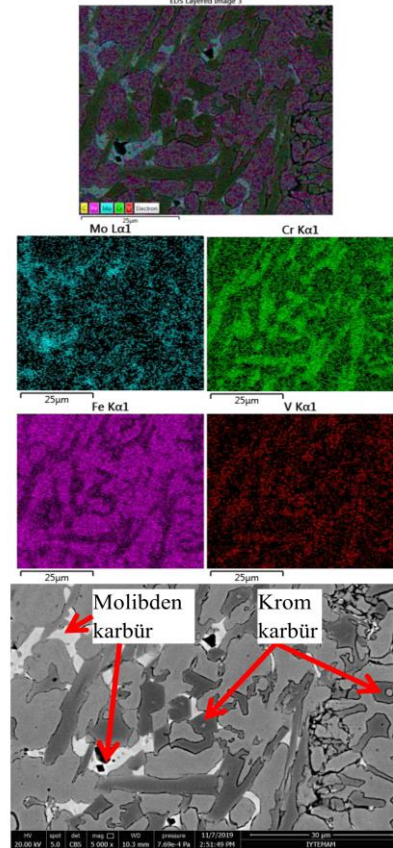
Kaplamaların üretiminde ferrokrom tozu hem krom hem de karbon kaynağı olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla toz karışımı içerisinde ferrovanadyum ve/veya ferromolibden oranının artması (izelge 1) karbon içeriğini dűřürerek seyrelmenin 4FeMo-10FeV ve 4FeMo-12FeV kaplamalarında belirgin bir şekilde gözlenmesine sebep olmuştur. Bu kaplamaların altlık malzemeye yakın bölgelerinde primer karbür oluşumu meydana gelmemiştir (şekil 7c ve 7d). Buna karşın 3FeMo-10FeV ve 3FeMo-12FeV kaplamaları ile altlık malzemesi arayüzeyinde, boyutları kaplamanın üst yüzeyindeki primer karbürlere kıyasla daha küçük olsa bile primer M_7C_3 karbür oluşumuna rastlanmıştır.

Optik mikroskop incelemelerinde molibden karbür tespit edilememiştir. Bununla birlikte XRD analizinde M_2C (M: Mo, Fe, Cr) fazına ait piklere rastlanmıştır (şekil 6). SEM incelemeleri sonucunda, altıgen şekilli primer M_7C_3 karbürleri haricinde düzensiz morfolojiye sahip ve molibden içeriği yaklaşık %23 olan fazlar tespit edilmiştir (şekil 5 ve şekil 8). Bu fazların M_2C karbürü (M: Mo, Fe, Cr) olduğu dűřünülmektedir. Liu ve arkadaşları, [13] molibden ilavesinin katılaşma esnasında M_2C ve/veya MC karbürlerin oluşumuyla sonuçlandığını ve molibden karbürlerin daha küçük boyutta ve M_7C_3 karbürlere göre daha düşük hacimsel oranda olduğunu belirtmişlerdir. SEM-EDX ve XRD analizleri sonucunda vanadyum karbür oluşumuna rastlanmamıştır. Vanadyumun M_7C_3 karbürleri içerisinde yer alma eğilimi sergilediği ve eser miktarda da matris fazında yer aldığı tespit edilmiştir (şekil 5, şekil 9).

3.2. Sertlik ve Aşınma Testi

Sert dolgu kaplamaların hacimsel karbür oranı-hacimsel aşınma kaybı-makro sertlik değerleri arasındaki ilişki şekil 10'da verilmiştir. Molibden ve vanadyum içeriğindeki artışın hacimsel karbür oranını artırarak kaplama sertliğinin artmasına ve dolayısıyla aşınma miktarının azalmasına katkı sağladığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik ve aşınma direnci, maksimum vanadyum ve molibden içeriğine sahip olması nedeniyle 4FeMo-12FeV kaplamasında beklenirken 4FeMo-10FeV

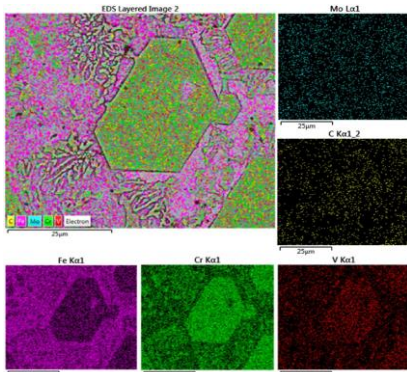
kaplamasında elde edilmiştir. Toz karışımının içerisinde ferrovanadyum miktarının artmasına ve ferrokrom içeriğinin azalmasına bağlı olarak karbon miktarı dűşmektedir. Sabet ve arkadaşları, [14] artan karbon ve karbür yapıcı element içeriğinin hacimsel karbür oranını artırarak sertliği artırdığını ifade etmişlerdir. Her ne kadar vanadyum, molibden, krom gibi karbür yapıcı elementler ilave edilse de karbon miktarının azalması karbür oluşumunu azaltmıştır (şekil 10). Ayrıca, XRD analizlerinden görűleceđi gibi $M_{23}C_6$ karbürünün pik şiddeti en yüksek 4FeMo-10FeV numunesinde tespit edilmiştir (şekil 6). $M_{23}C_6$ karbürü M_7C_3 karbürüne kıyasla daha düşük sertliktedir [15]. Artan $M_{23}C_6$ karbür miktarının 4FeMo-10FeV kaplamasının kırılma tokluğunu ve sertliğini dengeleyerek aşınma direncine olumlu katkıda bulunduğu dűřünülmektedir.



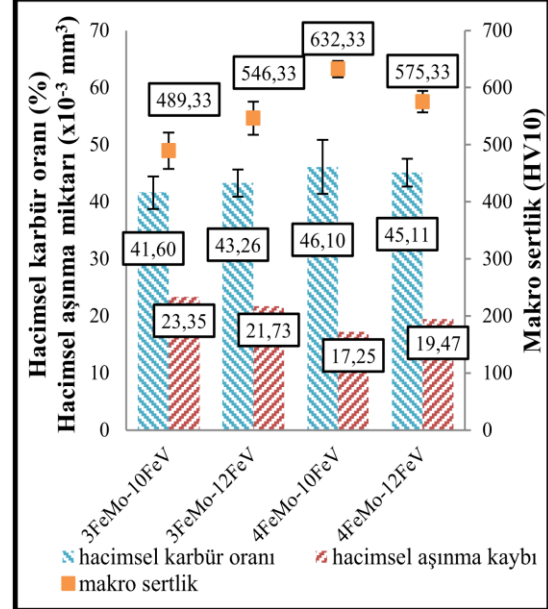
şekil 8. 3FeMo-12FeV numunesinin elementel dağılım haritası

Ferrovanyum oranları sabit kalmak kaydıyla ferromolibden içeriği değişen kaplamalar kıyaslandığında -örneğin; 3FeMo-10FeV ve 4FeMo-10FeV- artan molibdenin hem sertliği hem de aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir. Wang ve arkadaşlarının [16] belirttiği gibi molibden, hem katı çözültü sertleşmesi sağlayan hem de MC ya da M_2C karbürleri şeklinde çökerek dayanımı artıran element olarak görev almaktadır. M_7C_3 karbürlerin yanı sıra M_2C karbür oluşumunu desteklemesi (Şekil 4 ve Şekil 6) ve matris fazında katı çözültü oluşturarak sertliği artırması sebebiyle molibden miktarındaki artış kaplamanın aşınma direncini artırmıştır.

Literatürde pek çok çalışmada [17-20] primer M_7C_3 karbürlerin aşınma direncini artırdığı ifade edilmektedir. Bununla birlikte çalışma esnasında ağır yüke maruz kalmaları iri ve kırılğan primer karbürlerin matris fazından kırılarak dökülmelerine sebep olabilir ve aşınma şiddetini artırabilir [21]. Şekil 11'de görüldüğü gibi 3FeMo-10FeV kaplamasında oluşan iri primer karbürler (Şekil 4a) aşınma testi esnasında gevrek kırılmaya uğramıştır. Bu nedenle, iyi düzeyde bir aşınma direnci için iri boyutlu primer M_7C_3 karbürlerin oluşumu tek başına yeterli değildir. Venkatesh ve arkadaşları, [22] sert dolgu alaşımlarının aşınma direncinin karbür morfolojisine, dağılımına, oranına ve matrisin tokluğuna bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu çalışmada, artan molibden ve vanadyum miktarıyla daha ince taneli fakat yüksek hacimsel orana sahip M_7C_3 karbürlerin oluşumu hacimsel aşınma kaybını azaltmıştır.



Şekil 9. 3FeMo-10FeV kaplamasına ait SEM-EDX analizi

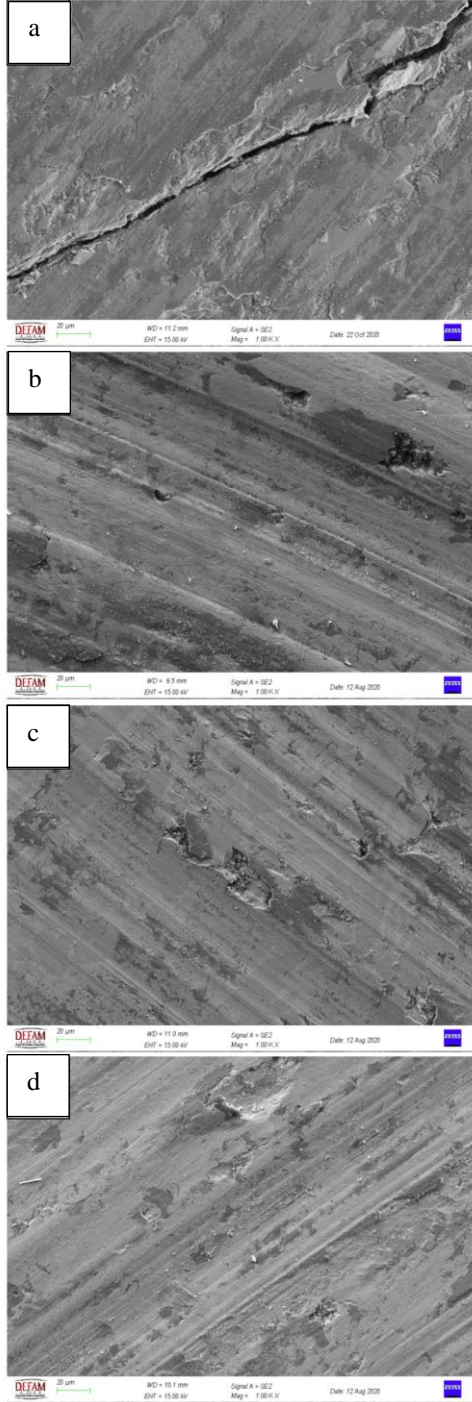


Şekil 10. Hacimsel karbür oranı-aşınma kaybı-makro sertlik ilişkisi



Şekil 11. 3FeMo-10FeV kaplamasında karbürlerin gevrek kırılması

Aşınma yüzeyleri incelendiğinde, abrazyif aşınma oluşumunu işaret eden sürekli çiziklerin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 12). Ayrıca bazı bölgelerde primer karbürlerde meydana gelen gevrek kırılmalara bağlı malzeme kaybının oluşturduğu çukurcuklara rastlanmıştır. 3FeMo-10FeV kaplamasının aşınma yüzeyinde hızlı soğumadan ileri geldiği düşünülen makro çatlak oluşumu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Kaplamaların aşınma yüzeyi: a) 3FeMo-10FeV, b) 3FeMo-12FeV, c) 4FeMo-10FeV, d) 4FeMo-12FeV

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında üretilen Fe-Cr-C-V-Mo sert dolgu kaplamalarına yapılan mikroyapı incelemelerinin, XRD analizi, sertlik ve aşınma testlerinin sonuçları kaplamaların içerdikleri ferromolibden ve ferrovanadyum oranlarına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Kaplamalarda vanadyum karbür oluşumuna rastlanmazken M_7C_3 (M: Fe, Cr) primer karbürlerin yanı sıra molibden içeren M_2C (M: Mo, Fe, Cr) karbürü ve $M_{23}C_6$ karbürü oluşmuştur. Vanadyum, primer M_7C_3 karbürleri içerisinde yer almıştır.
2. Artan molibden ve vanadyum miktarı primer karbür tane boyutunu küçültmüştür, bununla birlikte hacimsel karbür oranını artırmıştır. Artan hacimsel karbür oranı sertliği artırarak kaplamanın aşınma direncini geliştirmiştir. Özellikle molibden ilavesi M_2C karbürleri oluşturarak aşınma direncine büyük ölçüde katkı sağlamıştır. En yüksek sertlik ve aşınma direnci %4 ferromolibden+%10 ferrovanadyum içeren kaplamada elde edilmiştir.
3. İri taneli ve kırılgan primer M_7C_3 karbürlerin aşınma esnasında gevrek kırılmaya uğraması ve kaplamada hızlı soğumaya bağlı olarak makro çatlakların oluşması aşınma direncini düşürmüştür. $M_{23}C_6$ karbürünün ise aşınma direncine olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Tüm kaplamalarda abrazyif aşınma türünün hakim olduğu görülmüştür ve abrazyif aşınma sonucunda kaplamaların aşınma yüzeylerinde sürekli çizikler meydana gelmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, MCBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “2019-074” numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar MCBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne sağlanan destek dolayısıyla teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

1. Pawar, S., Jha, A.K., Mukhopadhyay, G., 2019. Effect of Different Carbides on the Wear Resistance of Fe-based Hardfacing Alloys. *Int. J. Refract. Met. H.*, 78, 288-295.
2. Nagentrau, M., Tobi, A.M., Sambu, M., Jamian, S., 2019. The Influence of Welding Condition on the Microstructure of WC Hardfacing Coating on Carbon Steel Substrate. *Int. J. Refract. Met. H.*, 82, 43-57.
3. Balaguru, S., Abid, M., Gupta, M., 2020. Investigations on Different Hardfacing Processes for High Temperature Applications of Ni-Cr-B-Si Alloy Hardfaced on Austenitic Stainless Steel Components. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10062-10072.
4. Balalan, Z., Mehmet, Y.A.Z., Yılmaz, S.O., 2017. GTAW Yöntemi ile Oluşturulan FeB-FeTi-FeW-C Kaplamalarının Mikroyapı ve Adhesiv Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(2), 203-212.
5. Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., Subramanian, C., 2014. Hardfacing Using Ferro-alloy Powder Mixtures by Submerged Arc Welding. *Surf. Coat. Tech.*, 260, 220-229.
6. Qi, X., Jia, Z., Yang, Q., Yang, Y., 2011. Effects of Vanadium Additive on Structure Property and Tribological Performance of High Chromium Cast Iron Hardfacing Metal. *Surf. Coat. Tech.*, 205(23-24), 5510-5514.
7. Dilawary, S.A.A., Motallebzadeh, A., Houdková, Š., Medlin, R., Haviar, S., Lukáč, F., Afzal, M., Cimenoglu, H., 2018. Modification of M2 Hardfacing: Effect of Molybdenum Alloying and Laser Surface Melting on Microstructure and Wear Performance. *Wear*, 404, 111-121.
8. Wang, X., Han, F., Liu, X., Qu, S., Zou, Z., 2008. Microstructure and Wear Properties of the Fe-Ti-V-Mo-C Hardfacing Alloy. *Wear*, 265(5-6), 583-589.
9. Lin, C.M., Chang, C.M., Chen, J.H., Wu, W., 2010. The Effects of Additive Elements on the Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of Cr-Fe-C Hard-Facing Alloys. *J. Alloy. Compd.*, 498(1), 30-36.
10. Deng, H., Shi, H., Tsuruoka, S., 2010. Influence of Coating Thickness and Temperature on Mechanical Properties of Steel Deposited with Co-based Alloy Hardfacing Coating. *Surf. Coat. Tech.*, 204(23), 3927-3934.
11. Rovatti, L., Lemke, J.N., Lecis, N.O.R.A., Stejskal, O., Vedani, M., 2015. Effect of Dilution on Microstructure and Wear Resistance of a Fe-based Hardfacing Alloy with a High Amount of Carbide-forming Elements. *Conference Papers in Science*, 2015, Article ID 276374, Hindawi
12. Singh, M., Majid, M., Akhtar, M.A., Arora, H., Chawla, K., 2017. Wear Behaviour of SMAW Hardfaced Mild Steel and Influence of Dilution Upon Hardfacing Properties. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(7), 1652-1661.
13. Liu, D., Wang, J., Zhang, Y., Kannan, R., Long, W., Wu, M., Wang, Y., Li, L., 2019. Effect of Mo on Microstructure and Wear Resistance of Slag-free Self-shielded Metal-Cored Welding Overlay. *J. Mater. Process. Tech.*, 270, 82-91.
14. Sabet, H., Khierandish, S., Mirdamadi, S., Goodarzi, M., 2011. The Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with the Composition of Hypoeutectic, Eutectic, and Hypereutectic at Cr/C= 6. *Tribol. Lett.*, 44(2), 237-245.
15. Higuera-Cobos, O.F., Dumitru, F.D., Mesa-Grajales, D.H., 2016. Improvement of Abrasive Wear Resistance of the High Chromium Cast Iron ASTM A-532 Through Thermal Treatment Cycles. *Revista Facultad de Ingeniería*, 25(41), 93-103.
16. Wang, X.H., Han, F., Liu, X.M., Qu, S.Y., Zou, Z.D., 2008. Effect of Molybdenum on the Microstructure and Wear resistance of Fe-based Hardfacing Coatings. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 489(1-2), 193-200.
17. Cruz-Crespo, A., Fernández-Fuentes, R., Ferraressi, A.V., Gonçalves, R.A., Scotti, A., 2016. Microstructure and Abrasion Resistance of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Nb Hardfacing Alloys Deposited by S-FCAW and Cold Solid Wires. *Soldagem & Inspeção*, 21(3), 342-353.

18. Zhou, Y.F., Yang, Y.L., Li, D., Yang, J., Jiang, Y.W., Ren, X.J., Yang, Q.X., 2012. Effect of Titanium Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Layers. *Weld. J.*, 91(8), 229-235.
19. Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Savková, J., Jirka, M., 2008. Abrasive Wear of High Chromium Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. *Research in Agricultural Engineering*, 54(4), 192-198.
20. İrizalp, S.G., Saklakoğlu, N., İldaş, G., Demirok, S., 2018. 1.2714 Çeliği Üzerine Sert Dolgu Kaynağı ile Kaplanmış Fe-Cr-V Esaslı Alaşımın Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 35-46.
21. Króllicka, A., Szczepański, Ł., Konat, Ł., Stawicki, T., Kostencki, P., 2020. The Influence of Microstructure on Abrasive Wear Micro-mechanisms of the Claddings Produced by Welding Used in Agricultural Soil. *Materials*, 13(8), 1920
22. Venkatesh, B., Sriker, K., Prabhakar, V.S.V., 2015. Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art. *Procedia Materials Science*, 10, 527-532.

Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Adıyaman Gölbaşı-Adıyaman Merkez Arasının Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi

Berna TANRIVERDİ*¹, Osman ORHAN¹, Senem TEKİN²

¹Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Mersin

²Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarım Bölümü, Adıyaman

Geliş tarihi: 28.06.2021 Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Bu çalışmada, Gölbaşı-Merkez (Adıyaman) arasında kalan yaklaşık 1200 km²'lik bölgede yapay sinir ağları yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma alanında 177 heyelan bulunmakta olup, 79,85 km²'lik alana sahiptir. Duyarlılık değerlendirilmesi için yükseklik, jeoloji, yamaç eğimi, pürüzlülük, topoğrafik nemlilik indeksi parametreleri heyelan hazırlayıcı faktörler olarak kullanılmıştır. Çalışma alanından elde edilen veri seti rastgele seçim yöntemiyle %80'i analiz, %10'u test ve %10'u doğrulama verisi olmak üzere üçe ayrılmıştır. Elde edilen duyarlılık haritası çok düşük ile çok yüksek arasında 5 sınıfta değerlendirilmiştir. Elde edilen heyelan duyarlılık haritasına göre; çalışma alanının yaklaşık %30'u, mevcut heyelanların ise %78,4'ü yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda yer almaktadır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritasının doğruluğu alıcı işletim karakteristik eğrisi ve eğri altında kalan alan ile değerlendirilmiş olup 0,84 olarak hesaplanmıştır Bu değer kurulan modelin doğruluğunun yüksek bir değere sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Heyelan, Yapay sinir ağları, Heyelan duyarlılık değerlendirilmesi

Landslide Susceptibility Assessment Between Adıyaman Gölbaşı-Adıyaman Center with Artificial Neural Network Methods

Abstract

In this study, landslide susceptibility assessment was carried out using artificial neural networks in an area of approximately 1200 km² between Gölbaşı and Center (Adıyaman). There are 177 landslides in the study area and the area cover 79.85 km². Digital elevation model, geology, slope, roughness index, topographic position index (TPI) parameters were used as factors that controlling landslides in susceptibility evaluations. The data set belonging to the study area was divided into three as %80 analysis, %10 test and %10 validation data by the random selection method. The susceptibility map obtained was evaluated in 5 classes, from very low to very high. According to the susceptibility map; approximately %30 of the study area and %78.4 of landslides are located in high and very sensitive areas. The accuracy of the landslide susceptibility map obtained was evaluated with the receiver operating characteristic curve and the area under the curve and it was calculated as 0.84. This value shows that the accuracy of the established model has a high value.

Keywords: Landslide, Artificial neural network, Landslide susceptibility assesment

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Berna TANRIVERDİ, bernatnrverd@gmail.com

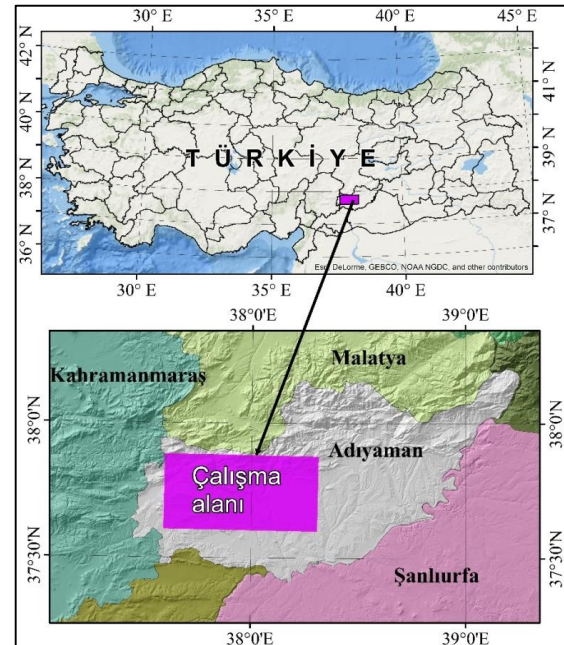
1. GİRİŞ

Afet genel anlamda, bir toplumu veya çevreyi olumsuz olarak etkileyen, aniden gelişen, doğa veya insan kaynaklı olaylar olarak tanımlanmaktadır. Heyelanlar; dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok can ve mal kaybına sebep olan doğal afetlerden biridir. Özellikle son yıllarda gelişen afetlerde, afet sonrası müdahale ve iyileştirme çalışmaları yürütülmektedir. Fakat çalışmalar afet sonrası döneme yönelik olduğundan, afetin yol açtığı kayıpların azaltılmasında etkisi bulunmamaktadır. Özellikle gelişen teknoloji ve yöntemler yardımıyla, heyelan envanter haritaları ve heyelana sebep olan çevresel değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi ile elde edilen heyelan duyarlılık değerlendirmeleri, heyelan afetinin çalışılan bölgede gelecekte nerelerde meydana geleceğine yönelik ışık tutmaktadır. Dolayısıyla, heyelan duyarlılık çalışmaları heyelanlardan kaynaklı afet zararlarının azaltılmasına yönelik faydalar sunmaktadır [1-2]. Heyelanları hazırlayıcı faktörler mevcut arazi koşullarına bağlı olarak, jeoloji/litoloji haritası, sayısal yükseklik modeli ve türev haritaları (yamaç eğimi, yamaç eğrisellikleri, pürüzlülük vb.) ile arazi kullanımı/razi örtüsü modellerinden oluşmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda, heyelan duyarlılık değerlendirmesinde CBS teknikleri kullanılarak farklı araştırmalar yapılmıştır [3-9]. Bu anlamda arazi kullanım planlaması, sürdürülebilir kalkınma sürecinin merkezinde yer almakta olup, doğal afetlere yönelik yapılmış planlanan planlama çalışmalarda doğal olası tehlikelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [9]. Gerek arazi yönetimi gerek afet yönetimi konusunda sürdürülebilir bir planlama açısından ülkemizde sık rastlanan doğal afet olaylarından heyelanların mekansal olarak nerede gerçekleşebileceğini gösteren duyarlılık haritaları, bölgesel ölçekli planlama ve heyelan zarar azaltma çalışmalarının önemli aşamalarından birini oluşturmaktadır [9-11]. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması; heyelanların tipi, dağılımı ve envanter haritasının güvenilirliği başta olmak üzere, heyelanları hazırlayıcı uygun çevresel değişkenlerin göz önünde bulundurulması gibi birçok faktöre bağlıdır [9].

Bu çalışmada ise, Adıyaman Gölbaşı – Adıyaman Merkez arasında CBS tabanlı olmak üzere bölgede meydana gelebilecek heyelanlar için yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak duyarlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Heyelan duyarlılık haritasının güvenilirliği önceden gerçekleştiği bilinen heyelan envanterleri ile modellenmiş ve karşılaştırılarak kontrol edilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

Bu çalışma; Adıyaman iline bağlı Gölbaşı ve Merkez ilçeleri arasında kalan 1200 km²'lik bölgede gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanının iklimi yer yer karasal iklim karakteristiği gösterse de çoğunlukla Akdeniz iklim özelliğini kapsamaktadır. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 88,8 iken yıllık ortalama yağış miktarı 720 mm'dir. En fazla yağış Aralık-Ocak ayında; en az yağış ise Temmuz-Ağustos aylarında gerçekleşmektedir. Ortalama yıllık sıcaklık ise 17,2 °C'dir. En yüksek sıcaklık Temmuz-Ağustos; en düşük sıcaklıklar ise Ocak-Şubat aylarında meydana gelir [12].

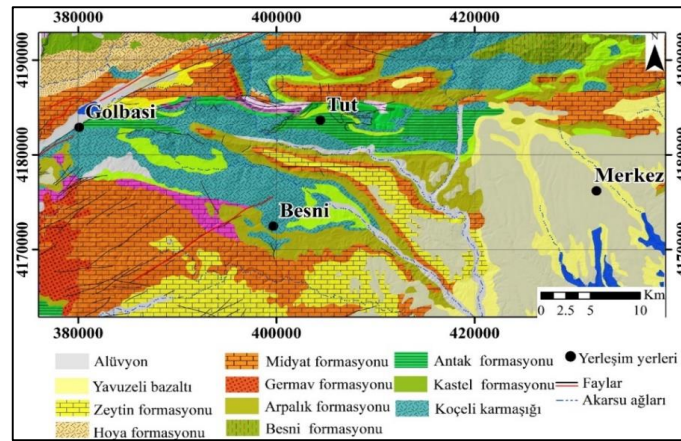


Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

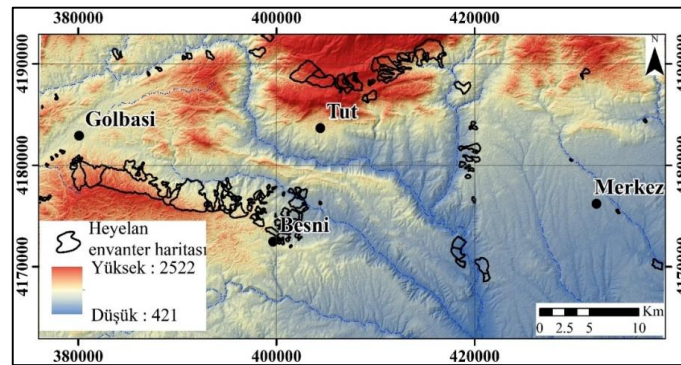
2.1. Heyelanları Hazırlayıcı Çevresel Değişkenler

Çalışmada heyelanları hazırlayıcı faktörler olarak başta jeoloji haritası olmak üzere (Şekil 2), İkincil faktörler olarak ASTER Sayısal Yükselik Modeli (ASTER GDEM) (Global Digital Elevation Model V003) (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team 2019) (Aster GDEM)'den elde edilen 28 m yersel çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (SYM) ve türev haritaları olan yamaç eğimi, yamaç yönelimi, pürüzlülük indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi parametreleri kullanılmıştır. Çalışma alanında 177 heyelan bulunmakta olup alansal olarak 79,85 km²'lik alansal büyüklüğe sahiptir (Şekil 3). Jeolojik olarak, Sayısal yükseklik Ekay zonunun güneyinde bulunan çalışma alanındaki birimler, üst alloktan seri tarafından tektonik

olarak üzerlenmektedir. Üst Kretase-Miyosen zaman aralığında Arap kıtasının kuzeyindeki farklı tektonik birliklerin birleşmesi ile farklı naplar bölgede gelişmiştir. Bu nap paketleri Eosen döneminin sonlarında okyanusun gerilemesiyle birlikte Arap platformu ile çarpışmıştır. Naplar ile Arap platformu arasındaki gerilimler sonucu bölgede biriken deformasyonlara bağlı olarak doğu-batı gidişi ters fay ve şaryaj dilimlerinden oluşan ekay zonu gelişmiştir. Çalışma alanı ve civarında temelde Koçali Karmaşığı yer almaktadır. Birimin üzerine uyumsuzlukla otokton birimler yüzelemektedir. Jura-Alt Kretase yaşlı Koçali karmaşığı, Koçali ofiyoliti ile volkanosedimanter özellikteki Koçali melanjını kapsamaktadır [13]. Otokton birimler olarak; Katel, Antak, Besni, Arpalık, Germav, Midyat, Hoya, Zeytin formasyonları, Yavuzeli bazaltı ve alüvyonlardan oluşmaktadır.



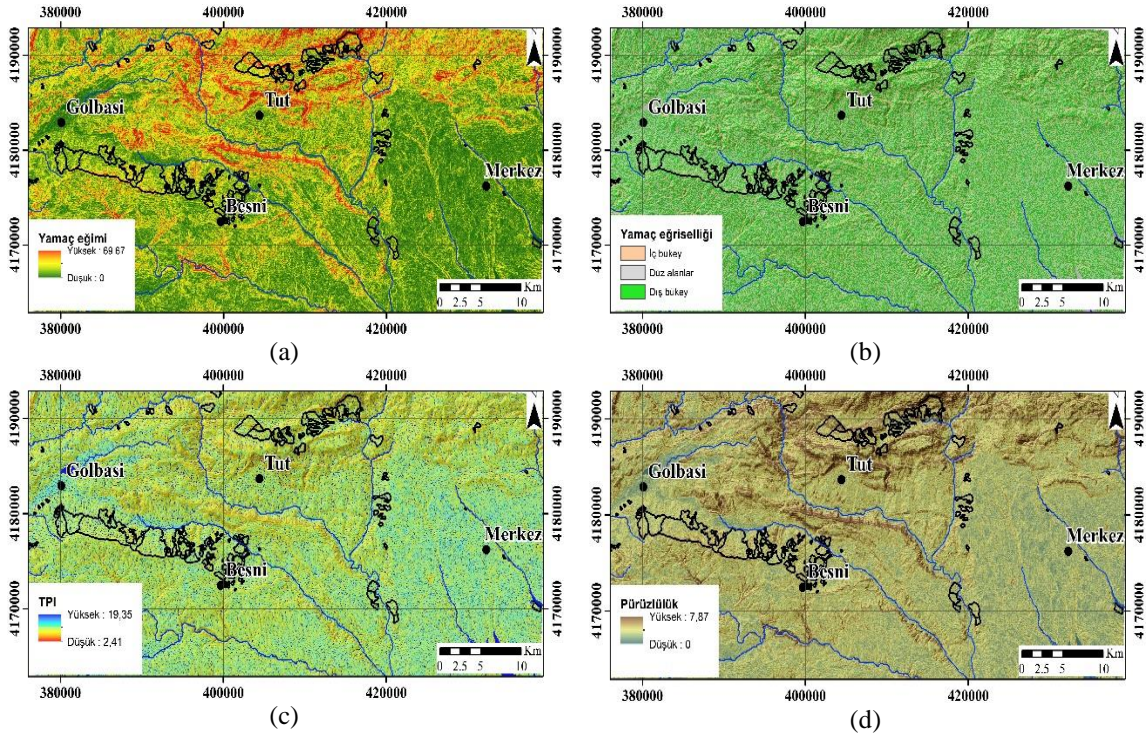
Şekil 2. Çalışma alanına ait jeoloji haritası [14]



Şekil 3. Sayısal yükseklik modeli ve çalışma alanına ait heyelan envanter haritası [15]

Sayısal yükseklik modeli kullanılarak üretilen yamaç eğimi, yamaç eğriselliği, topoğrafik nemlilik indeksi (TPI) ve pürüzlülük indeksi (TPI) ve pürüzlülük indeksi parametreleri raster tabanlı 100 metre yersel çözünürlükte çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4). Eğim, lokasyonu belli iki nokta arasında ki düşey mesafenin yatay mesafeye oranının tanjantı ile hesaplanmaktadır. Özellikle yamaçların iç kesimlerde yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir (Şekil 4a). Yamaç eğriselliği parametresi, yüzeysel su akış hızı ve yüzey malzemesinin yamaç boyunca taşınımı ile ilgili parametrelerden biri olup, çalışılan bölgede eğim değişim oranını ifade etmek için kullanılmaktadır (Şekil 4b). İç bükey ve

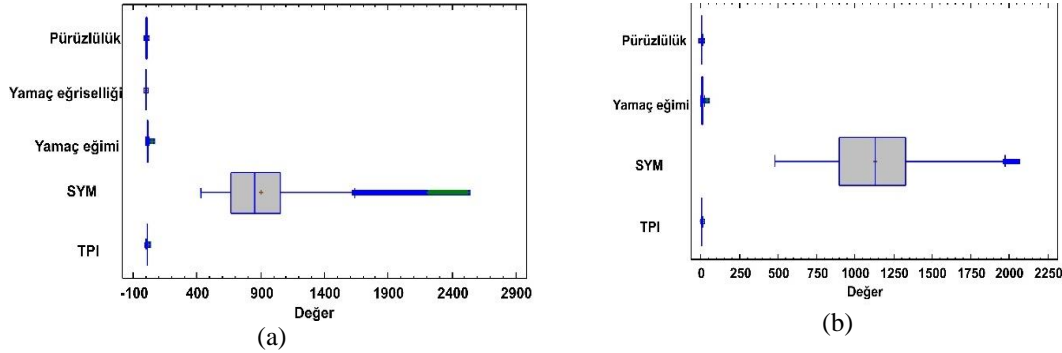
dış bükey yamaç şekilleri (Şekil 4c) hidrolojik akış durumunu kontrol etmesi bakımında heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan parametrelerden birini oluşturmaktadır. Topografik nemlilik indeksi (TWI) yüzeysel akış potansiyeline sahip bölgelerin belirlenmesinde kullanılan önemli değişkenlerden biridir. Pürüzlülük indeksi parametresi (Şekil 4d), arazinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesinde, sediment taşıma modellemesi, ekolojik çalışmalar, arazi şekillerinin jeomorfolojik değerlendirilmesi ve doğal afetler ile ilgili birçok farklı çalışmada kullanılan parametrelerden biridir.



Şekil 4. Çalışma alanına ait yamaç eğimi, yamaç eğriselliği (b), topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) (c), pürüzlülük indeksi (d) haritaları

Heyelanları hazırlayıcı çevresel değişkenlere ait detaylı istatistiksel veriler Şekil 5a, b'de verilmiştir. Buna göre çalışma alanının geneli için pürüzlülük, yamaç eğimi, sayısal yükseklik modeli (SYM) ve topoğrafik pozisyon indeksi (TPI) parametreleri sırasıyla en düşük 0, 0,421, 3,24 değere sahipken en yüksek 11,40, 51,22, 2522 ve

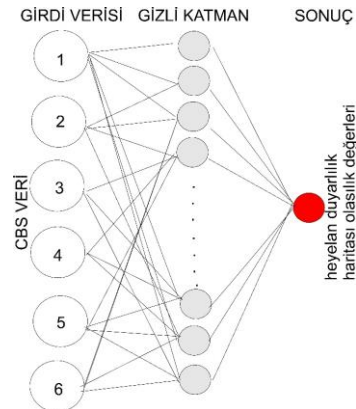
17,60 değerlere sahiptir. Heyelanlı alanlarda ise değerler pürüzlülük, yamaç eğimi, sayısal yükseklik (SYM) ve topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) parametreleri sırasıyla en düşük 0,58, 0,481, 3,49 değere sahipken en yüksek 10,84, 44,96, 2058 ve 14,10 değerlere sahiptir.



Şekil 5. Pürüzlülük, yamaç eğriselliği, yamaç eğimi, sayısal yükseklik modeli topoğrafik nemlilik indeksi parametrelerinin çalışma alanı (a) ve heyelanlı alanlara (b) ait dağılım istatistikleri

Heyelan duyarlılık değerlendirmeleri genel olarak niceliksel ve niteliksel olmak üzere değerlendirilmekte olup her ikisinde de alt yöntemler bulunmaktadır [16]. Niceliksel yöntemlerden veri güdümlü yöntemlerden literatürlerde tercih edilme oranı yüksek olan yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak bu çalışma gerçekleştirilmiştir. YSA paralel olarak bağlantılı olan çok sayıda basit elemanın biyolojik sinir sistemi benzerleriyle etkileşim kuran, matematiksel modelleme yöntemleri bütünü olarak tanımlanmaktadır [17]. Geri yayılma eğitim algoritması, en sık kullanılan sinir ağı yöntemi olması sebebiyle bu çalışmada da tercih edilmiştir. Geri yayılma eğitim algoritması, bir dizi ilişkili veriyi kullanılarak eğitim algoritması içerir. Girdi (heyelanları hazırlayıcı çevresel değişkenler) ve çıktı (heyelanlı bölgeler) değerleri, belirlenen gizli katman sayıları ile siyah kutu denilen arka planda işlenir ve sonuç olasılık değerleri üretilir. Öğrenme algoritması, çok katmanlı bir sinir ağıdır. Sinir ağlarını kullanmanın iki aşaması vardır: ilk aşama iç ağırlıkların hesaplandığı eğitim aşaması ikinci aşama ise sınıflandırma aşamasıdır. Tipik olarak, geri yayılma algoritması, ağın istenen ve gerçek çıktı değerleri arasında hedeflenen bir minimum hata elde edilene kadar ağı eğitir. Eğitim tamamlandıktan sonra, ağ tüm veriler için bir sınıflandırma oluşturmak için ileri beslemeli bir yapı olarak kullanılır. Bir sinir ağı, birbirine bağlı birkaç düğümden oluşur. Her bir düğüm basit bir işlem elemanıdır diğer düğümlerden aldığı ağırlıklı girdilere tepki verir. Bu düğümlerin düzenlenmesi, ağ mimarisi olarak belirtilir (Şekil 6). Alıcı düğüm,

önceki katmanda bağlı olduğu tüm düğümlerden gelen ağırlıklı sinyalleri toplar.



Şekil 6. Yapay sinir ağı yapısı

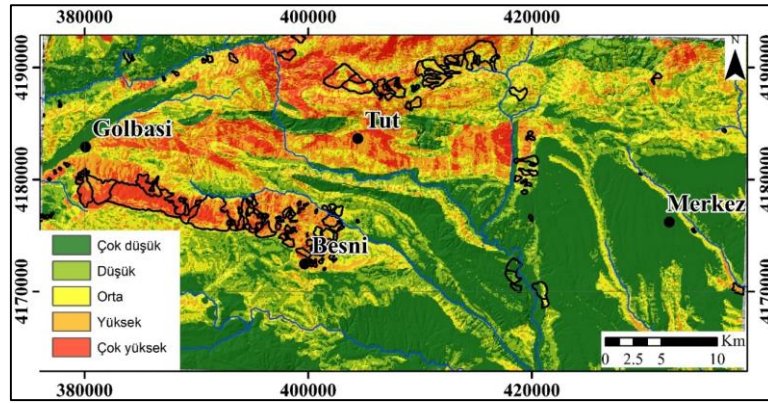
3. BULGULAR

Gölbaşı (Adıyaman)-Merkez (Adıyaman) arasında yapılan heyelan duyarlılık değerlendirmesi YSA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 6 değişken 100 m yersel çözünürlüğe göre hazırlanmıştır. Karsoliya (2012) [18] tarafından önerilen giriş katman sayısının üçte ikisi ile iki katı arasında değişen gizli katman sayıları denenmiş ve en iyi sonuç elde edilen 15 gizli katman kullanılarak duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanına ait veri seti rastgele seçim yöntemiyle %80 analiz, %10 test ve %10 doğrulama verisi olmak üzere üçe ayrılmıştır. Heyelan duyarlılık haritası çok düşük, düşük, orta,

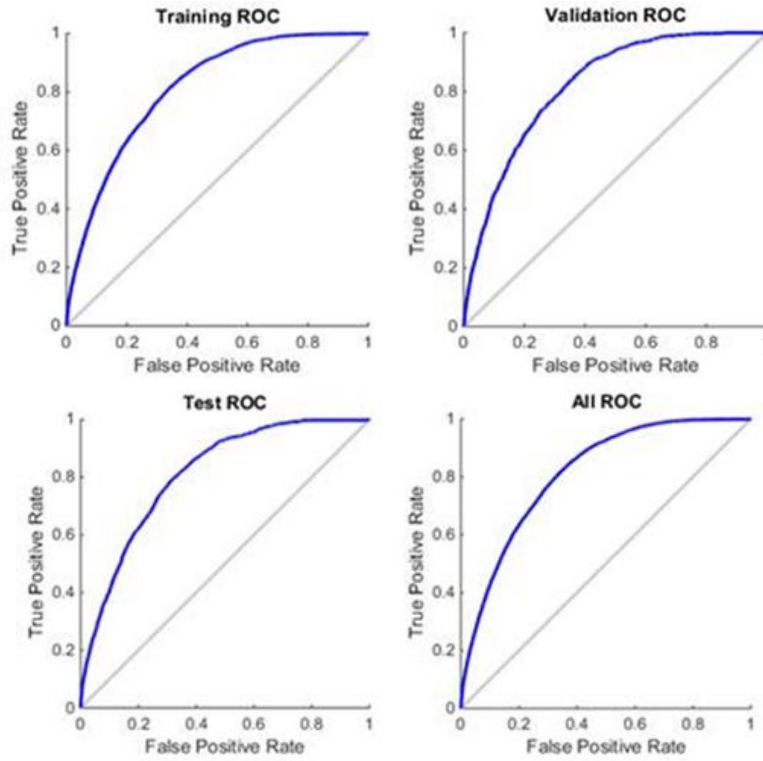
yüksek ve çok yüksek olmak üzere eşit aralıklarla beş sınıfta değerlendirilmiştir (Şekil 7).

Elde edilen duyarlılık haritasına göre; çalışma alanının yaklaşık %30'u heyelanların ise %78,4'ü yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda yer almaktadır. Elde edilen heyelan duyarlılık

haritasının doğruluğu alıcı işletim karakteristik eğrisi ve eğri altında kalan alan ile değerlendirilmiş olup 0,84 olarak hesaplatılmıştır (Şekil 8). Bu değer kurulan modelin uyum iyiliğinin yüksek ve çok yüksek uyuma sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Heyelan duyarlılık haritası



Şekil 8. Alıcı işletim karakteristik eğrileri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Adıyaman Gölbaşı–Adıyaman Merkez arasında kalan bölge için yapay sınır ağları yöntemi kullanılarak mekansal olabilirlik değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen heyelan duyarlılık haritasının güvenilirliği önceden gerçekleştiği bilinen heyelan envanterleri ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Elde edilen duyarlılık haritasına göre; çalışma alanının yaklaşık %30'u heyelanların ise %78,4'ü yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda yer aldığı gözlemlenmiştir. Çalışma alanının Gölbaşı (Adıyaman)-Besni (Adıyaman) arası ile Tut (Adıyaman) ve çevresinde heyelana duyarlı alanların yoğunlaştığı görülmüştür. Heyelan duyarlılığının yüksek olduğu bu alanlarda; heyelan ve heyelanla ilişkili olası tehlikeleri önlemeyi mümkün kılacak alanlar hakkındaki bilgilere ışık tutmakta. Yapılan çalışmanın sonuçları diğer meslek disiplinleri için de altlık oluşturmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Lee, C.F., Li, J., Xu, Z. W., Dai, F.C., 2001. Assessment of Landslide Susceptibility on the Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3), 381-391.
2. Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-based Landslide Susceptibility Mapping for a Problematic Segment of the Natural Gas Pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44(8), 949-962.
3. Scheuren, J.M., Le Polain, O., Below, R., Guha-Sapir, D., Ponserre, S., 2007. Annual Disaster Statistical Review. The Numbers and Trends, Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., 2002 (Janua), 1060-1069.
4. Pradhan, B., 2010. Landslide Susceptibility Mapping of a Catchment Area Using Frequency Ratio, Fuzzy Logic and Multivariate Logistic Regression Approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38, 301-320.
5. Pradhan, B., Youssef, A.M., 2010. Manifestation of Remote Sensing Data and GIS on Landslide Hazard Analysis Using Spatial-based Statistical Models. *Arabian Journal of Geosciences*, 3, 319-326.
6. Bednarik, M., Yilmaz, I., Marschalko, M., 2012. Landslide Hazard and Risk Assessment: a Case Study from the Hlohovec–Sered'landslide Area in South-west Slovakia. *Natural hazards*, 64, 547–575.
7. Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Althuwaynee, O.F., 2013. Landslide Susceptibility Mapping Using Certainty Factor, Index of Entropy and Logistic Regression Models in GIS and Their Comparison at Mugling-narayanghat Road Section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, 65, 135–165.
8. Regmi, A.D., Devkota, K.C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Kumamoto, T., Akgun, A., 2014. Application of Frequency Ratio, Statistical Index, and Weights-of-evidence Models and Their Comparison in Landslide Susceptibility Mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 725–742.
9. Tekin, S., Çan, T., 2019. Yapay Sınır Ağları Yöntemi ile Ermenek Havzası'nın (Karaman) Kayma Türü Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi. *Bilge Int. J. Sci. Technol. Res.*, 3(1), 21-28.
10. Chu, H.J., Chen, Y.C., 2018. Crowdsourcing Photograph Locations for Debris Flow Hot Spot Mapping. *Nat. Hazards*, 90(3), 1259-1276.
11. Hu, W., Scaringi, G., Xu, Q., Huang, R., 2018. Internal Erosion Controls Failure and Runout of Loose Granular Deposits: Evidence From Flume Tests and Implications for Postseismic Slope Healing. *Geophys. Res. Lett.*, 45(11), 5518-5527.
12. URL-1: <https://www.mgm.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 01.02.2021.
13. Yildirim, N., Parlak, O., Robertson, A., 2012. Geochemistry and Tectonic Significance of the Koçali Ophiolite and the Related Koçali Melange , Adiyaman region, SE Turkey, 65th Geological Congress of Turkey, 82-83.
14. Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ.E., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ.H., Hakyemez, H.Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N.,

- Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M.F., Yurtsever, A., ve Diğerleri, 2011. 1:1.250.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara-Türkiye.
15. Duman, Ö., Çan, T.Y., Emre, T., 2011. Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/1,500,000 Ölçekli, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, 27, 23.
 16. Corominas, J., Van, Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitiakakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T., 2014. Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263.
 17. Kohonen, T., 1982. Self-organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biol. Cybern.*, 43(1), 59-69.
 18. Karsoliya, S., 2012. Approximating Number of Hidden Layer Neurons in Multiple Hidden Layer BPNN Architecture. *Int. J. Eng. Trends Technol.*, 3(6), 714-717.

Ni-B/TiB₂ Elektrodepolanmış Kompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Belirlenmesi

Ersin ÜNAL¹, Abdulkadir YAŞAR^{*2}, İsmail Hakkı KARAHAN³

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

²Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

³Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 31.05.2021 Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Bu çalışmada, St37 çelik altlık üzerine elektrokimyasal olarak depolanan nikel-bor (Ni-B) alaşım ana yapılı ve titanyum diborür (TiB₂) takviye parçacık destekli kompozit kaplamaların korozyon davranışları saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalar ile mukayese edilerek incelenmiştir. Üretilen kaplamalar Watts tipi geleneksel nikel banyosunda depolanmıştır. Kaplamaların korozyon dayanımlarının belirlenmesinde açık devre potansiyeli (OCP) grafikleri, Tafel ekstrapolasyon ve elektro empedans spektroskopisi (EIS) yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen OCP grafiklerinde kompozit kaplamanın saf nikel ve Ni-B alaşımına göre korozyon potansiyeli açısından daha pozitif tarafta olduğu görülmektedir. Tafel sonuçlarında ise kompozit kaplamanın korozyon dirençlerinde saf nikel ve Ni-B alaşımına göre %84, Ni-B alaşımına göre ise %87 civarlarında bir iyileşme olduğu belirlenmiştir. EIS sonuçlarında da Tafel sonuçlarında olduğu gibi korozyon dayanımında ciddi bir gelişme olduğu görülmüştür. Elde edilen verilere göre, kompozit kaplamanın korozyon direnç değerlerinin saf nikel ve Ni-B alaşımına kıyasla yaklaşık 4 kat daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ni-B alaşım, Kompozit kaplama, Korozyon dayanımı, Tafel, EIS, TiB₂

Determination of Corrosion Resistance of Ni-B/TiB₂ Electrodeposited Composite Coatings

Abstract

In this study, the corrosion behavior of nickel boride (Ni-B) alloy main structure and titanium diboride (TiB₂) reinforced particle supported composite coatings deposited electrochemically on a St37 steel substrate was compared with pure nickel and Ni-B alloy coatings. The coatings produced were stored in a Watts-type conventional nickel bath. Open circuit potential (OCP) graphs, Tafel extrapolation and electro impedance spectroscopy (EIS) methods were used to determine corrosion resistances. In the OCP graphs obtained, it was seen that the composite coating was on the positive side in terms of corrosion potential compared to pure nickel and Ni-B alloy. In the Tafel results, it was determined that the corrosion resistance of the composite coating increased by %84 compared to pure nickel and %87 compared to the Ni-B alloy. EIS results showed a serious improvement in corrosion resistance as in Tafel results.

* Sorumlu (Corresponding author) yazar: Abdulkadir YAŞAR, ayasar@cu.edu.tr

According to the data obtained, it was understood that the corrosion resistance values of the composite coating were approximately 4 times better than pure nickel and Ni-B alloy.

Keywords: Ni-B alloys, Composite coating, Corrosion resistance, Tafel, EIS, TiB₂

1. GİRİŞ

Genellikle korozyon, aşınma veya kırılma şeklinde meydana gelen bir malzemenin hasarı, çoğu zaman malzemenin yüzeyinden başlayarak performansını ve hizmet ömrünü azaltabilmektedir. Çünkü aşınma veya korozyon gibi hasar mekanizmalarına önce yüzey maruz kalmaktadır. Malzemelerin yığın özelliklerinin iyileştirilmesi ile karşılaştırıldığında, yüzey teknolojisi (kaplama ve modifikasyon) etkili ve düşük maliyetli bir yöntemdir [1-5]. Bu nedenle, yüzey modifikasyonu veya yüzey kaplama teknolojisi, özellikle korozyon ve aşınma sürecini minimize etmek açısından mühendislik parçalarının bozulma sürecini engellemek veya geciktirmek için imalat süreçlerinde yaygın olarak kullanılabilir [6]. Performansını artırmak amacıyla malzeme yüzeyinin mukavemetini güçlendirmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Çoğunlukla, korozyon ve aşınma süreçleri, deniz mühendisliği, madencilik, petrol ve kimya endüstrisi gibi birçok alanda kullanılan her bir işleme kıyasla daha ciddi hasara neden olma eğilimindedir [7-9]. Bu nedenle, yüksek korozyon direnci ve aşınma önleyici özelliklere sahip daha gelişmiş bir yüzey koruyucu kaplama geliştirmek gerekmektedir. Yüzey özelliklerinin çeşitli yöntemlerle geliştirilebilmesine (veya değiştirilebilmesine) rağmen, partiküllerin metalik ana yapıda elektrokimyasal olarak birlikte depolanması, gelişmiş performanslı kompozit kaplama imal etmenin etkili bir yoludur [10]. Çeşitli yöntemler arasında elektrodepolama yöntemi, metal ana yapı kompozit malzemeyi yüzey koruyucu kaplama olarak optimize edilmiş koşullarda hazırlamak en önemli yaklaşımlardan biridir [11]. Bunun nedeni, elektrodepolamanın basitlik, esneklik, ucuzluk, kontrol edilebilirlik ve verimlilik gibi birçok benzersiz avantajlara sahip olmasıdır [10]. Dahası, elektrodepolama pürüzsüz yüzey, yüksek çökeltme oranları ve partiküller ile

metal ana yapı arasında daha iyi bağlanma açısından önemli avantajlara sahiptir [12,13].

Son yıllarda mükemmel özellikleriyle öne çıkan nikel-bor alaşım kaplamalar, yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine ve iyi korozyon önleyici özelliklere sahiptir. Ni-B kaplamalar ayrıca yağlayıcılık, mükemmel lehim kabiliyeti, iyi elektriksel özellikler, antibakteriyel özellikler, olağanüstü elektromanyetik özellikler ve düşük gözeneklilik gibi özellikleri ile bilinir. Bununla birlikte, Ni-B kaplamalara ısıl işlem uygulandığında, Ni-P kaplamalardan korozyona daha dayanıklı olduğu ve ticari sert krom kaplamalardan daha sert olduğu bilinmektedir. Ni-B kaplamaların yüksek erime noktası (1350-1360 °C) sebebiyle yüksek termal dayanıklılığa sahiptir. Ayrıca Ni-B kaplamalar düşük elektrik direnci ($89 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) dolayısıyla elektronik endüstrisi için de uygun bir alaşımdır. Ni-B kaplamalar otomotiv, uzay, nükleer, petrokimya, bilgisayar, elektronik, plastik, optik, tekstil, kâğıt, gıda ve baskı sektörleri gibi birçok endüstri dalında kullanılabilir [14,15]. Ni-B alaşım kaplamalar elektriksiz depolama yöntemi ile yaygın olarak üretilmektedir, bununla birlikte Ni-B alaşım kaplamaların elektrodepolama yöntemi ile üretilmesi son zamanlarda ilgi çeken bir araştırma konusu olarak göze çarpmaktadır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte malzemelerin daha zorlu koşullara dayanıklı olması gerekliliği dolayısıyla, özelliklerinin daha üst seviyelere çıkarılması ihtiyacı daha da artmaktadır. Kompozit kaplamalar bir malzemenin özelliklerini daha üst seviyeye taşımak için tercih edilen en önemli yöntemlerden bir tanesidir. Ni-B alaşım kaplamaların seramik partiküllerle takviye edilerek özelliklerinin üst seviyeye çıkarılması ile ilgili birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu alaşım ZrO₂ [16], SiC [17], TiO₂ [18], Fe₂O₃ [19], AlN [15], Y₂O₃ [20], hBN [21-23], SiO₂ [24], elmas [25] gibi birçok seramik sert partiküllerle desteklenmiş ve ilgili yazarlar tarafından bu sayede Ni-B alaşım ana yapıda daha gelişmiş özelliklerin

elde edildiği raporlanmıştır. Ni-B alaşım ana yapının desteklenmesi açısından dikkate alınacak bir diğer seramik partikül malzeme ise TiB_2 sert parçacıklardır. TiB_2 üstün özellikleri ile bilinen bir malzemedir. İyi korozyon direnci, mükemmel mekanik ve aşınma direnci, iyi ısı şok direnci, yüksek ıslanabilme kabiliyeti, yüksek sertlik, yüksek erime noktası, kimyasal olarak kararlı olma gibi birçok arzu edilen özelliklere sahiptir. Bu özellikleri dolayısıyla birçok zorlu şartların olduğu kimyasal reaktör kapları, kesici takımlar, pompa ve türbin çarkları gibi yüzey mühendisliği uygulamalarında tercih edilebilen kaplama malzemesi olarak göze çarpmaktadır [26-28]. İlgili çekici özellikleri dolayısıyla Ni-B alaşım ana yapı ve TiB_2 takviye parçacıklarının bir araya gelmesiyle elde edilecek yeni malzemenin literatüre ve sektöre önemli katkılar sunacağını öngörülmektedir. Bu çalışmada, elektrokimyasal kaplama yöntemi ile Ni-B/ TiB_2 kompozit kaplama imal edilerek, korozyon özellikleri analiz edilmiş ve elde edilen bulgular saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalar ile mukayese edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Geleneksel Watts tipi nikel banyosunda gerçekleştirilen elektrokimyasal depolama sürecinde altlık olarak St37 çelik kullanılmıştır. Çelik altlık alanı $0,282 \text{ cm}^2$ 'dir. Elektrodepolama banyosunda 3 elektrotlu sistem kullanılmıştır. Elektrolit içerisinde katot, anot ve referans elektrotlar dikey olarak yerleştirilmiş ve aralarında yaklaşık olarak 3'er cm mesafe bırakılmıştır. Referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) ve anot olarak ise platin tel kullanılmıştır. Altlıklar kaplama sürecinden önce yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Önce üzerindeki yağ, kir ve pas tabakalarının temizlenmesi amacıyla, kalından inceye (sırasıyla 600-1200-2400 Al_2O_3 zımpara kağıtları kullanılmıştır) doğru zımparalanmıştır. Bu işlemin akabinde ise %10 hidroklorik asitli (HCl) saf sulu çözelti içinde 1-2 dk dağlama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra altlıklar oda sıcaklığında kurutularak kaplama işlemi için hazır duruma gelmiştir. Korozyon deneyleri de dahil olmak üzere, bütün elektrokimyasal süreçler, CH

instruments 608E marka ve model cihaz ile yapılmıştır. Kompozit kaplama 3 farklı bileşenden oluşmaktadır. Saf nikel, bor ile alaşımlama ve mikro TiB_2 parçacıkları ile takviye edilme olmak üzere 3 farklı bileşen tanımlanabilir. Elektrokimyasal banyoda saf nikel kaynağı olarak nikel sülfat hekza hidrat ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$) ve nikel klorür hekza hidrat ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$), bor elementi kaynağı olarak da trimetilamin boran kompleksi (TMAB) kullanılmıştır. Sheu ve arkadaşları [29], elektrodopolanmış nikel bor alaşımı ile ilgili çalışmalarında, bor kaynağı amaçlı kullanılabilen dimetilamin boran'ın (DMAB), trimetilamin boran kompleksi'ne (TMAB) göre daha yüksek sıcaklıklarda ($>75 \text{ }^\circ\text{C}$) çözüldüğünü ve TMAB'lı kaplama elektrolitinin diğer seçeneğe göre daha dengeli olduğunu ifade etmişlerdir. Bu açıklamalar ışığında TMAB'ın elektrokimyasal banyolar için daha uygun olduğu ifade edilebilir. Kompozit kaplama içinde takviye fazı olarak banyo içine 2-5 μm boyutunda titanyum diborür (TiB_2) toz parçacıkları ilave edilmiştir. Banyoya toz parçacıkların ilavesi ile birlikte, tozların malzemesine göre değişim göstermekle birlikte topaklanma, dibe çökme veya yüzeye çıkma gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için iki farklı çözüm uygulanmıştır. Birincisi sodyum dodesil sülfat (SDS) isimli kimyasal elektrolite ilave edilmiş ve bu sayede dibe çökme veya yüzeye çıkma sorunlarının önüne geçilmiştir. Topaklanma sorunu ise depolama işleminden hemen önce 30 dk ultrasonik işlem uygulayarak giderilmiştir. Ultrasonik işlem için Hielscher UP 200S marka ve model ultrasonik karıştırma cihazı kullanılmış ve çevrim değeri 1, genlik değeri ise %70 olarak ayarlanmıştır ($\sim 22 \text{ kHz}$). Bunlara ilaveten pH düzenleyici ve kompleks yapıcı ajan olarak borik asit (H_3BO_3) elektrolite belli oranda eklenmiştir. Tüm kaplama süreçlerinde 50 mA/cm^2 akım yoğunluğu ve 4 pH değeri kullanılmıştır. Banyo sıcaklığı ise $43 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ civarlarında sabit değerde tutulmaya çalışılmıştır. Depolama süresi ise 60 dk olarak ayarlanmıştır. Çizelge 1'de banyo parametreleri ve elektrolit muhteviyatı özet olarak sunulmuştur. Depolama akabinde kaplama numuneleri saf su ile yıkanarak oda sıcaklığında kurumaya terkedilmiştir.

Çizelge 1. Banyo parametreleri ve elektrolit içerikleri

Banyo parametreleri	Değeri	
Akım yoğunluğu	50 mA/cm ²	
pH	4	
Sıcaklık	43±1 °C	
Süre	60 dk	
Banyo karıştırma hızı	200-300 rpm	
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma	30 dk	
Elektrolit içeriği	Görevi	Miktarı
NiSO ₄ .6H ₂ O (Nikel sülfat hekza hidrat) %99,99	Nikel kaynağı	240 g/l
NiCl ₂ . 6H ₂ O (Nikel klorür hekza hidrat) %98	Nikel kaynağı	45 g/l
H ₃ BO ₃ (Borik asit) %99,5	Kompleks yapıcı	30 g/l
Trimetilamin boran kompleks (TMAB) %97	Bor kaynağı	3 g/l
Titanyum diborür tozu (TiB ₂) %99 mikro boyutta (2-5 µm)	Takviye parçacık	12 g/l
Sodyum dodesil sülfat (SDS) %99	Yüzey aktifleştirici	0,5 g/l
Sakarin %98	Tane küçültücü	2 g/l

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kaplamaların Korozyon Analizleri

Elektrokimyasal olarak depolanan Ni-B/TiB₂ kompozit kaplama ve mukayese amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaların korozyon performansları açık devre potansiyeli (OCP), Tafel ekstrapolasyon (potansiyodinamik polarizasyon eğrisi) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bütün korozyon deneyleri %3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir.

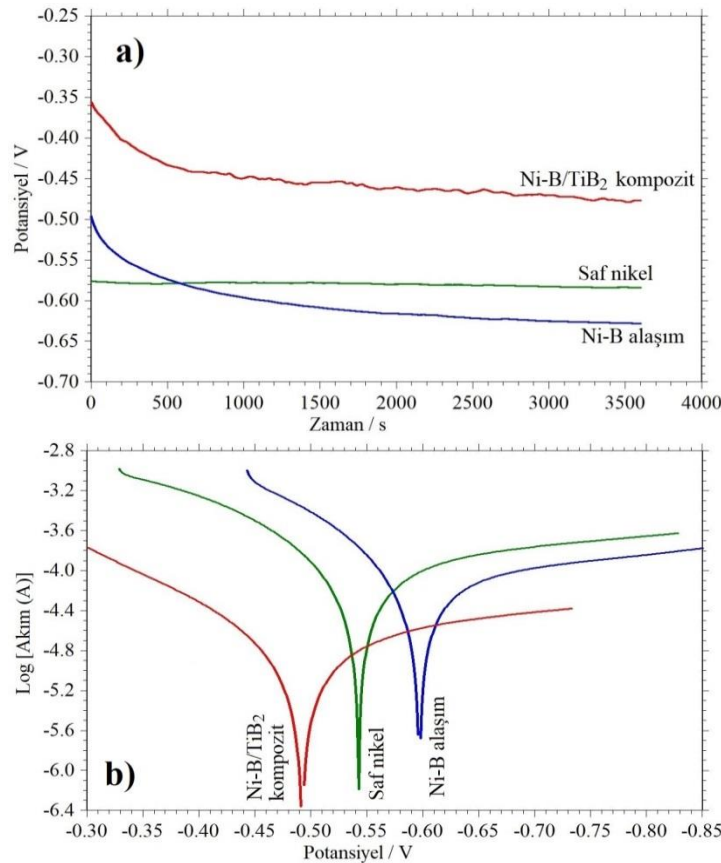
Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamayla birlikte mukayese amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaların OCP eğrileri Şekil 1a'da verilmiştir. OCP eğrileri ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde kararlı bir potansiyel değeri elde edebilmek amacıyla 3600 s boyunca kaydedilmiştir. İyonik bir çözeltide kaydedilen OCP potansiyeli katodik ve anodik reaksiyonların bir denge potansiyelidir. Yani çözelti ortamı için yükseltgenme ve indirgenme aktivitelerini temsil etmektedir. Eğer çözelti ortamı korozif bir özellikte ise kaydedilen bu OCP potansiyelini korozyon potansiyeli olarak kabul edilebilir. Birbirleri ile mukayese edilen kaplamaların açık devre potansiyelleri açısından daha pozitif tarafta olanların daha negatif tarafta olanlara göre korozyona daha dirençli oldukları söylenebilir [30]. Şekil 1a incelendiğinde saf nikelin korozyon potansiyeli -0,57 V civarlarında

yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Ni-B alaşımının OCP eğrisinin ise ilk başta saf nikel göre daha pozitif bir potansiyelde (-0,49 V) başlamasına rağmen, zamanla saf nikel göre daha negatif tarafa konumlanarak yaklaşık -0,62V civarlarına kadar değişim göstermiştir. Normalde bor ile alaşımlama yapmak saf nikelin korozyon dayanımını artırmaktadır. Fakat aşırı gergin içyapıdan dolayı kaplamada meydana gelen çatlaklar, korozyon dayanımının düşmesine sebep olmuş olabilir. Ni-B alaşımının mikro boyuttaki TiB₂ parçacıkları ile takviye edilmesi, OCP eğrisi potansiyelinin daha pozitif tarafa kaymasına sebep olmuştur. Bu durumda Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamanın, saf nikel ve Ni-B alaşımına göre korozyon dayanımının daha iyi olduğu öne sürülebilir. Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamanın OCP potansiyeli -0,35 V civarlarından başlayarak 3600 saniye süre sonuna kadar -0,47 V civarlarına doğru değişim göstermiştir.

Tafel deneyleri açık devre potansiyelinin 0,25 V altından, 0,25 V üstüne kadar olan potansiyel aralığında 1 mV/s tarama hızında ve %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler Tafel ölçümü gerçekleştirilmeden önce dengeli bir potansiyel değeri elde edebilmek amacıyla %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde bir saat süreyle bekletilmiştir. Şekil 1b'de üretilen kaplamaların Tafel ekstrapolasyon grafikleri karşılaştırma amacıyla bir arada sunulmuştur. Ayrıca, Çizelge 2'de ise bu eğrilerden elde edilen

korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri sunulmuştur. Şekil 1 b incelendiğinde, saf nikelin Tafel eğrisinin -0,55 V civarlarında konumlandığı görülmektedir. Ni-B alaşım kaplamanın ise saf nikelde göre biraz daha negatif tarafta olduğu ve -0,58V civarlarında konumlandığı görülmektedir. Alaşım kaplamanın takviye TiB_2 parçacıkları ile desteklenmesi neticesinde Tafel eğrisi saf nikelde göre daha pozitif tarafa kaymış ve -0,49V civarlarında konumlanmıştır. Ayrıca, Çizelge 2'deki veriler incelendiğinde korozyon dayanımı ile ilgili daha net çıkarımlara ulaşılabilir. Korozyon akımı açısından kaplamaların performanslarını karşılaştırdığımızda Ni-B alaşımının en yüksek değere sahip olduğunu, yani en düşük korozyon dayanımına sahip olduğunu görebiliriz. Normalde saf nikelde göre daha iyi bir korozyon dayanımı beklenen Ni-B alaşımında bu duruma mikro

çatlakların sebep olabileceği düşünülmektedir. Saf nikelin korozyon akımı Ni-B'dan bir miktar düşük olmakla birlikte, her iki kaplamaya ait değer birbirine yakın olduğu ifade edilebilir. Banyoya ilave edilen mikro TiB_2 parçacıklarla birlikte elde edilen kompozit kaplamaya bakıldığında, korozyon akımı değerinin çok büyük oranda düştüğü ve $1,68 \times 10^{-5}$ A olarak elde edildiği görülmektedir. Bu durumda saf nikelde göre korozyon akımında %84, Ni-B alaşımına göre ise yaklaşık %87 oranında bir azalış söz konusudur. Korozyon hızı bakımından incelediğimizde ise saf nikel ve Ni-B alaşımında 4,31 ve 5,13 mm/yıl değerleri elde edilirken, Ni-B/ TiB_2 kompozit kaplamada ise 0,69 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilen bu veriler neticesinde, mikro TiB_2 parçacıklarının ana yapıyı korozyon dayanımı açısından çok ciddi derecede güçlendirdiği ifade edilebilir.



Şekil 1. Kaplamaların korozyon analizi grafikleri, a) OCP, b) Tafel

Çizelge 2. Kaplamalarının Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon verileri

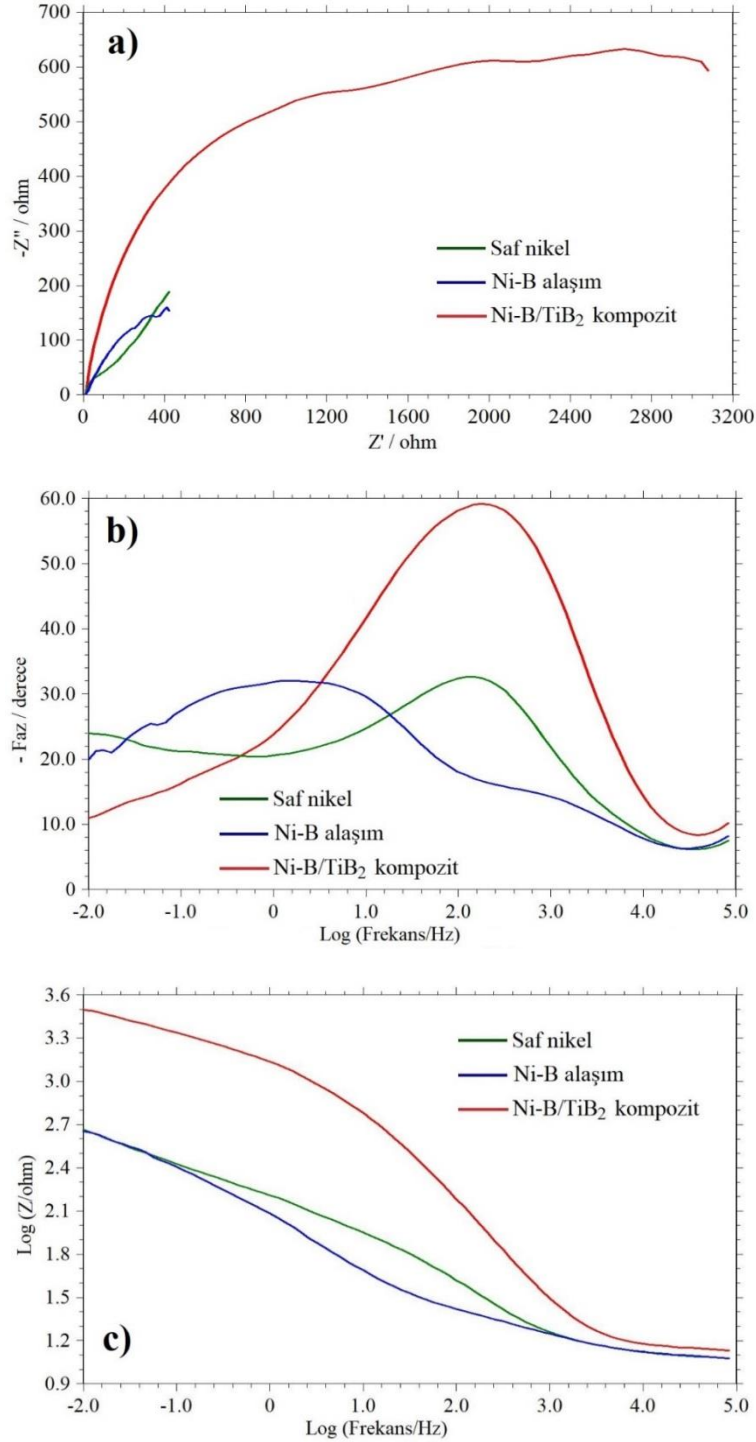
TMAB banyo konsantrasyonu (g/l)	E _{kor} (V)	I _{kor} (A)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Saf nikel	-0,556	10,5 x 10 ⁻⁵	4,31
Ni-B	-0,583	12,47 x 10 ⁻⁵	5,13
Ni-B/TiB ₂	-0,492	1,68 x 10 ⁻⁵	0,69

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmaları ise 10 mV genlikli AC akımla 100 kHz-10 mHz (10⁵-10⁻² Hz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Bütün korozyon deneyleri % 3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de EIS yöntemi ile elde edilen Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamaya ait Nyquist, empedans modülü ve Bode diyagramları verilmiştir. Ayrıca, mukayese amacıyla aynı grafiklerde saf nikel ve Ni-B kaplamalara ait eğriler de sunulmuştur. Şekil 2a’da verilen Nyquist (sanal direnç ile reel direncin birbirlerine karşı değişimini gösteren grafik) diyagramında görüleceği üzere, Ni-B/TiB₂ kompozit kaplama, saf nikel ve Ni-B kaplamalara göre oldukça geniş ve daha kapsayıcı bir eğriye sahip görünmekte ve sanal eksene daha yakın durmaktadır. Bu durumda kompozit kaplamanın korozyon performansının saf nikel ve Ni-B kaplamalara göre çok daha iyi olduğunu ifade edebiliriz. Genel olarak kaplamaların korozyondan koruma mekanizmasının bariyerleme (kapasitif) olduğu ifade edilebilir, yani kaplama sayesinde korozyona neden olan iyonlar altlığa ulaşmamaktadır.

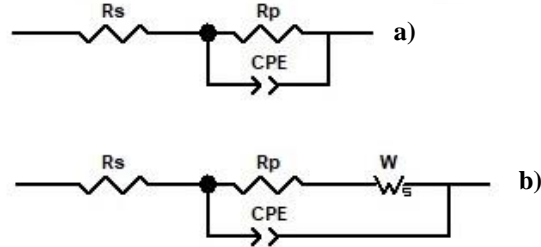
Şekil 2b’de verilen Bode (frekans ile faz açısının değişimini veren grafik) grafiği incelendiğinde Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamanın, saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaya göre çok daha yüksek faz açısına sahip olduğu görülmektedir. Saf nikel ve Ni-B kaplamaları kendi içinde karşılaştırdığımızda ise hemen hemen aynı faz açısı değerine sahip oldukları görülmektedir. Fakat iki kaplamaya ait piklerin farklı frekans bölgelerinde oluştuğu fark edilmektedir. Bode grafiğinde de kompozit kaplamanın daha iyi korozyon dayanımı performansı net bir şekilde anlaşılmaktadır. Şekil 2c’de verilen empedans modülü (frekans ve empedansın değişimini veren grafik) grafiğinde düşük frekans bölgesinde kompozit kaplamanın saf nikel ve Ni-B kaplamaya göre oldukça yüksek empedans modülü değerine sahip olduğu görülmektedir. Düşük frekans bölgesinde

kompozit kaplamanın artan empedans modülü değeri, kaplamanın daha iyi bariyerleme (kapasitif) özelliği sergilediğinin bir göstergesidir. Korozyon aktivitesi açısından rezistif karakterin baskın olduğu yüksek frekans bölgelerinde tüm empedans modülü eğrilerinin birbirlerine çok yaklaştıkları görülmektedir [31]. Fakat yüksek frekans bölgesinde kompozit kaplamanın saf nikel ve Ni-B kaplamalara göre az olsa daha yüksek empedans modülü değerine sahip olduğu ifade edilebilir. Saf nikel ve Ni-B kaplamaları kendi içlerinde değerlendirdiğimizde ise hem düşük hem de yüksek frekans bölgelerinde her iki kaplamanın da empedans modülü değerleri birbirlerine oldukça yakın bir seyir izlemektedirler.

Çizelge 3’de, Şekil 2a’da verilen Nyquist eğrilerinin eşdeğer elektrik devresi fitleme eğrilerinden elde edilmiş veriler sunulmuştur. Nyquist eğrilerinin eşdeğer devre fitleme işlemi Zview programı ile gerçekleştirilmiştir. Orijinal eğriler ve fitleme eğrileri Şekil 4’de bir arada verilmiştir. Şekil 3’de ise fitleme işleminde kullanılan elektrik eşdeğer devreler sunulmuştur. Saf nikel ve Ni-B/TiB₂ için Şekil 3b ile gösterilen warburg empedanslı devre kullanılmıştır. Ni-B alaşım kaplama için ise Şekil 3a’da gösterilen eşdeğer devre kullanılmıştır. Elektrik eşdeğer devrelerinde ve Çizelge 3’de “Rs” çözelti direncini, “Rp” ve “W-R” kaplamanın toplam direncini, “W-P” Nyquist eğrisindeki warburg kısmının eğimini, “CPE-T” ve “CPE-P” ise kaplamaya ait sabit faz elemanını temsil etmektedir. Çizelge 3’deki veriler incelendiğinde, saf nikel kaplamaya ait direnç değerinin 1150 ohm civarlarında olduğu görülmekte olup Ni-B alaşım kaplamanın direnç değeri ise 900 ohm civarlarındadır. Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamanın toplam direnç değerinin ise saf nikel ve Ni-B alaşımına kıyasla çok daha yüksek olduğu ve 4100 ohm civarlarında olduğu görülmektedir. Elde edilen bu verilerin Şekil 2a’da verilen Nyquist eğrileri ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



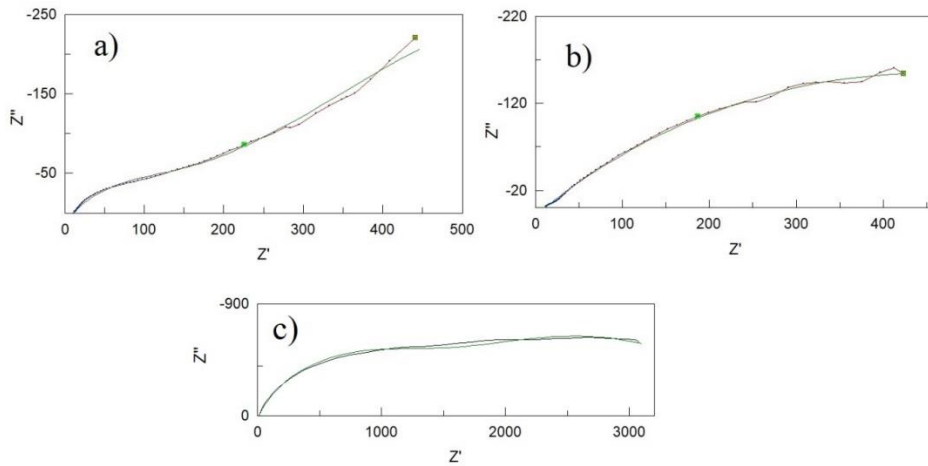
Şekil 2. Ni-B/TiB₂ kompozit, Ni-B ve saf nikel kaplamaların EIS grafikleri a) Nyquist, b) Bode, c) Empedans modülü, (TMAB banyo konsantrasyonu 3 g/l, akım yoğunluğu 50 mA/cm²)



Şekil 3. Empedans eşdeğer elektrik devreleri

Çizelge 3 Ni-B/TiB₂ kompozit, Ni-B alaşım ve saf nikel kaplamalara ait empedans eşdeğer devre analizi parametreleri

Numune	Rs	Rp	CPE-T	CPE-P	W-R	W-P
Saf nikel	11	150	0,0027	0,53	1000	0,36
Ni-B alaşım	11	880	0,011279	0,43	-	-
Ni-B/TiB ₂	11	1000	0,00027	0,73	3100	0,261



Şekil 4. Nyquist eğrilerinin eşdeğer devre fitleme grafikleri, a) saf nikel kaplama, b) Ni-B alaşım kaplama, c) Ni-B/TiB₂ kompozit kaplama

Korozyon genel olarak yüzeyden başlamakta ve yüzeydeki mikro veya nano gözenek, çukur veya çatlaklar gibi kusurlardan kaplamanın iç kısımlarına doğru ilerlemektedir. Bahsedilen bu kusurların miktarı ne kadar fazlaysa korozyon hızı da o derece artış göstermektedir. Metal veya alaşım şeklindeki ana yapıya ilave edilen mikro partiküller, kristallerin büyümesi esnasında çok sayıda çekirdek merkezi oluşmasına neden olmakta ve ince taneli, homojen, sıkı ve yoğun (kompakt) bir yapı ortaya çıkmasını sağlamaktadırlar. Dahası, parçacıklar mikro kusur

ve çatlaklara doğru etkili bir şekilde absorblanabilmekte ve kusurları doldurmada önemli bir rol oynayabilmektedirler. Bu durum kaplamanın sıkılık ve yoğunluk (kompaktlık) seviyesini geliştirmekte ve korozyon ortamının kaplamaya nüfuz etmesini önlemektedir. Genelde seramik olan bu partiküller kimyasal olarak kararlı ve elektriksel olarak yalıtkan oldukları için korozyon ortamlarında altlık ile çözelti arasında bariyer görevi görmektedirler. Ni-B/TiB₂ kompozit kaplamaların korozyon dayanımındaki gelişmenin yukarıda sayılan faktörlere bağlı olduğu düşünülebilir [32].

4. SONUÇLAR

St37 çelik altlık üzerine geleneksel elektrodepolama metoduyla nikel-bor (Ni-B) alaşım ana yapılı ve titanyum diborür takviye parçacıklı kompozit kaplama üretilmiş ve korozyon özellikleri araştırılmıştır. Kompozit kaplamanın ana bileşenlerinden saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalar da mukayese edilmek amacıyla yine St37 çelik altlık üzerine depolanarak, korozyon özellikleri belirlenmiştir. Kaplamaların önce açık devre potansiyeli grafikleri (OCP) elde edilmiş, müteakiben Tafel ekstrapolasyon ve elektro empedans spektroskopisi (EIS) yöntemleri ile korozyon dayanımları irdelenmiştir. Tafel sonuçlarına göre saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalara kıyasla, kompozit kaplamanın korozyon direncinin %80'den daha fazla iyileşme sergilediği görülmektedir. Ayrıca, EIS sonuçlarına göre korozyon direncinde çok ciddi bir artış elde edilmiştir. Saf nikel için 1150 ohm ve Ni-B alaşım için 900 ohm civarlarında direnç değerleri elde edilirken, Ni-B/TiB₂ kompozit kaplama için bu değer 4100 ohm civarlarında elde edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre Ni-B alaşımına, TiB₂ parçacık takviyesinin korozyon dayanımında çok büyük katkılar sağladığı görülmektedir

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (Proje ID: 12868).

6. KAYNAKLAR

1. Li, B., Li, X., Huan, Y., Xia, W., Zhang, W., 2018. Influence of Alumina Nanoparticles on Microstructure and Properties of Ni-B Composite Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 762, 133-142.
2. García-Aguirre, C.A., Domínguez-Ríos, C., Torres-Sánchez, R., Román-Aguirre, M., Holguín-Momaca, J.T., Aguilar-Elguézabal A., 2015. Microstructure and Transmission Electron Microscopy Characterization of Electroless Ni-B Thin Films Deposited on MWCNTs. *Surface&Coatings Technology*, 282, 107-114.
3. Li, D., Li, B., Du, S., Zhang, W., 2019. Synthesis of a Novel Ni-B/YSZ Metal-ceramic Composite Coating Via Singlestep Electrodeposition at Different Current Density. *Ceramics International*, 45, 24884-24893.
4. Shakoar, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Properties of Electrodeposited Ni-B-Al₂O₃ Composite Coatings. *Materials and Design*, 64, 127-135.
5. Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ.H., 2019. A Review of Electrodeposited Composite Coatings with Ni-B Alloy Matrix. *Materials Research Express*, 6, 092004.
6. Shakoar, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-CeO₂ Composite Coatings. *Materials and Design*, 59, 421-429.
7. Bekish, Y.N., Poznyak, S.K., Tsybul'skaya, L.S., Gaev'skaya, T.V., 2009. Electrodeposited Ni-B Alloy Coatings; Structure, Corrosion Resistance and Mechanical Properties. *Electrochimica Acta*, 55, 2223-2231.
8. Yazdani, S., Tima, R., Mahboubi F., 2018. Investigation of Wear Behavior of As-plated and Plasma-nitrided Ni-B-CNT Electroless Having Different CNTs Concentration. *Applied Surface Science*, 457, 942-955.
9. Mehr, M.S., Akbari, A., Damerchi, E., 2019. Electrodeposited Ni-B/SiC Micro-and Nanocomposite Coatings: A Comparative Study. *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 477-487.
10. Li, B., Mei, T., Li, D., Du, S., 2019. Ultrasonic-assisted Electrodeposition of Ni-Cu/TiN Composite Coating From Sulphate-citrate Bath: Structural and Electrochemical Properties. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 58, 104680.
11. Gül, H., Kılıç, F., Aslan, S., Alp, A., Akbulut H., 2009. Characteristics of Electro-co-Deposited Ni-Al₂O₃ Nano-particle Reinforced Metal Matrix Composite (MMC) Coatings. *Wear*, 267, 976-990.
12. Kumaraguru, S., Kumar, G.G., Raghu, S., Gnanamuthu, R.M., 2018. Fabrication of Ternary Ni-TiO₂-TiC Composite Coatings and Their Enhanced Microhardness for Metal Finishing Application. *Applied Surface Science*, 447, 463-470.

13. Li, H., He, Y., He, T., Fan, Y., Yang, Q., Zhan, Y., 2016. The Influence of Pulse Plating Parameters on Microstructure and Properties of Ni-W-Si₃N₄ Nanocomposite Coatings. *Ceramic International*, 42, 18380-18392.
14. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-Zn Ternary Alloy Coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 5520-5536.
15. Waware, U.S., Hamouda, A.M.S., Wasekar, N.P., 2018. Mechanical Properties, Thermal Stability and Corrosion Behavior of Electrodeposited Ni-B/AlN Nanocomposite Coating. *Surface&Coatings Technology*, 337, 335-341.
16. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2015. Properties of Electrodeposited Ni-B-ZrO₂ Composite Coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 2110-2119.
17. Ogihara, H., Wang, H., Saji, T., 2014. Electrodeposition of Ni-B/SiC Composite Films with High Hardness and Wear Resistance. *Applied Surface Science*, 296, 108-113.
18. Wang, S.J., Wang, Y., Shu, X., Tay, S., Gao, W., Shakoor, R.A., Kahraman, R., 2015. Preparation and Property of Duplex Ni-B-TiO₂/Ni Nano-composite Coatings. *International Journal of Modern Physics B*, 29, 1540022: 1-7.
19. Waware, S., Wasekar, N.P., 2017. Manufacture and Properties of Ni-B-Fe₂O₃ Composite Nano-Coatings by Electrodeposition. *Journal of Material Sciences&Engineering*, 6, 6.
20. Shakoor, R.A., Waware, U.S., Ali, K., Kahraman, R., Popelka, A., Yusuf, M.M., Hasan, A., 2017. Novel Electrodeposited Ni-B/Y₂O₃ Composite Coatings with Improved Properties. *Coatings*, 7, 161.
21. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Production and Characterization of Electrodeposited Ni-B/hBN Composite Coatings. *Surface&Coatings Technology*, 333, 125-137.
22. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Investigation of Effect of the Bath Components on Coating Properties in Electrodeposition of Ni, Ni-B and Ni-B/hBN Coatings. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 663-672.
23. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Effects of Ultrasonic Agitation Prior to Deposition and Additives in the Bath on Electrodeposited Ni-B/hBN Composite Coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 763, 329-341.
24. Shakoor, R.A., Waware, U.S., Kahraman, R., Popelka, A., Yusuf, M.M., 2017. Corrosion Behavior of Electrodeposited Ni-B Coatings Modified with SiO₂ Particles. *International Journal of Electrochemical Science*, 12, 4384-4391.
25. Monteiro, O.R., Murugesan, S., Khabashesku, V., 2015. Electroplated Ni-B films and Ni-B Metal Matrix Diamond Nanocomposite Coatings. *Surface&Coatings Technology*, 272, 291-297.
26. Ett, G., Pessine, E.J., 1999. Pulse Current Plating of TiB₂ in Molten Fluoride. *Electrochimica Acta*, 44, 2859-2870.
27. Gyawali, G., Cho, S.H., Lee, S.W., 2013. Electrodeposition and Characterization of Ni-TiB₂ Composite Coatings. *Metals and Materials International*, 19 (1), 113-118.
28. Gyawali, G., Tripathi, K., Joshi, B., Lee, S.W., 2017. Mechanical and Tribological Properties of Ni-W-TiB₂ Composite Coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 757-763.
29. Sheu, H.H., Tzeng, Y.C., Syu, J.H., 2019. Study of the Strengthening Mechanism of Electrodeposited Ni-B Thin Films with Ultra-low Boron Content. *Materials Letters*, 238, 275-277.
30. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2014. Structural and Corrosion Protection Properties of Electrochemically Deposited Nano-sized Zn-Ni Alloy Coatings. *Applied Surface Science*, 318, 15-23.
31. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2019. Effect of Octylphenyl Ether Group Nonionic Surfactant on the Electrodeposition of the Hexagonal Boron Nitride Reinforced Ni-B Matrix Composite Coatings. *Surface&Coatings Technology*, 381, 125131.
32. Li, B., Zhang, W., 2020. Facile Synthesis and Electrochemical Properties of a Novel Ni-B/TiC Composite Coating via Ultrasonic-assisted electrodeposition. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 61, 104837.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316 Paslanmaz Çelik ve Karbonlu Çelik Çiftlerinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi

Yeliz ALNAK^{*1}, Ali ÖZER², Vedat SAVAŞ³

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sivas

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji Mühendisliği Bölümü, Sivas

³Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ

Geliş tarihi: 21.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Sürtünme karıştırma kaynağı, belirli bir hızda dönen bir pim metaler arasında sürtünmesiyle oluşan ısıyı kullanarak, benzer veya benzer olmayan malzemeleri katı halde kaynaklamak için kullanılan bir katı hal kaynak tekniğidir. Kaynak, kaynak yapılacak malzemelerden daha sert olan ve tükenmeyen bir pim ile yapılır. Bu çalışmada AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleştirilen çelik plakalar 3 mm kalınlığa, 60 mm genişliğe ve 120 mm uzunluğa sahiptir. Deneylerde omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızında ve takıma 1,5° açı verilerek gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenerek, en uyumlu kaynak çiftinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan mekanik testlerin ve mikroyapı analizlerinin sonuçlarından, en uyumlu kaynak çiftinin AISI 316-AISI 1010 olduğu ortaya çıkmıştır. Mekanik testlerde AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin 618,81 MPa çekme değeri ile diğer kaynak çiftlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Mikroyapıları incelendiğinde tane boyutunun malzemenin mukavemetini büyük ölçüde etkilediği, özellikle büyük tanelerin görüldüğü yerlerde malzemenin mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Paslanmaz çelik, Karbonlu çelik, Mekanik özellikler, SEM

Investigation of Mechanical Properties and Microstructures of AISI 316 Stainless Steel and Carbon Steel Pairs Combined by Friction Stir Welding

Abstract

Friction stir welding is a solid state welding technique used to weld similar or dissimilar materials in a solid state, using the heat generated by the friction of a pin rotating at a certain speed between metals. Welding is done with a non-consumable pin that is harder than the materials to be welded. In this study, AISI 316 austenitic stainless steel and plain carbon steels were joined by friction stir welding. Steel plates joined have a thickness of 3 mm, a width of 60 mm and a length of 120 mm. Tungsten carbide tip with an equilateral triangle profile with a shoulder diameter of 16 mm and a pin length of 2.7 mm was used in the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yeliz ALNAK, ytas@cumhuriyet.edu.tr

experiments. The friction stir welding was performed at a speed of 710 rpm and a welding speed of 63 mm/min, at an tilt angle of 1.5 ° to the tool. It is aimed to determine the most compatible weld pair by examining the microstructure and mechanical properties of the welded areas. From the results of the mechanical tests and microstructure analysis, it has been revealed that the most compatible welding pair is AISI 316-AISI 1010. In mechanical tests, it was seen that the AISI 316-AISI 1010 steel pair had the best value among other weld pairs with a tensile value of 618,81 MPa. When the microstructures were examined, it was observed that the grain size greatly affected the strength of the material, and the strength of the material decreased, especially where large grains were seen..

Keywords: Friction stir welding, Stainless steel, Carbon steel, Mechanical properties, SEM

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstriyel uygulamalarda işlevselliği arttırmak adına pek çok farklı malzeme bir arada kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin tek parça olarak üretilmesi mümkün olmadığı için ayrı ayrı üretilip daha sonra uygun bir birleştirme tekniği ile birleştirilmesi gerekmektedir. Birleştirme tekniklerinden biri olan kaynak, üretilmesi zor malzemelerden karmaşık parçaların meydana getirilmesine olanak sağlayan eşsiz bir yöntemdir. Üretim yöntemlerine alternatif olarak kullanılmayan kaynak, tamamlayıcı bir süreçtir [1].

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, kaynak yapılacak levhanın uzunluğu boyunca yüksek hızda dönen bir pim belirli bir hızda ilerletilmesi işlemidir. Birleştirme işleminde, kaynaklanacak malzemeden daha sert olan bir malzemeden yapılmış tükenmeyen bir pim kullanılır [2]. İş parçasında çok az çarpılma meydana gelmesi, kaynak bölgesinde mükemmel metalürjik özellikler, kaynak sırasında ilave metal kullanılmaması, çatlak olmaması, farklı kalınlıktaki malzemelerin birleştirilebilmesi açısından oldukça faydalı bir kaynak yöntemidir [3]. Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin birleştirilmesi için bu koşullarda sertliklerini koruyabilecek özel pimler ve güçlü kaynak makineleri gerekir [4].

İyi bir kaynak için, dönme hızı (devir sayısı), ilerleme hızı, dalma derinliği, eğim açısı, uç geometrisi, omuz çapı gibi parametrelerin doğru belirlenmesi gerekir. Bu sayede karıştırma bölgesinde ince taneli yapılar ve iyi mekanik özellikler elde edilebilir [5].

Dönme ve ilerleme hızlarının değişken olarak alındığı parametrelerle yapılan çalışmalardan Aktarer ve arkadaşları [6] sabit ilerleme hızı ve üç farklı takım dönme hızı kullanarak birleştirdikleri benzer olmayan dissimilar kaynakta en yüksek mukavemet değerinin ve en fazla uzamanın 1250 dev/dak dönme hızında gerçekleştiğini görmüşlerdir. Reynolds ve arkadaşları [7] sabit ilerleme hızı ve iki farklı dönme hızlarında similar kaynak birleştirmeleri yapmışlardır. Düşük devir sayısı ile yaptıkları kaynakta mm başına ısı girdisinin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bundan dolayı kaynak merkezinde daha küçük tanecikli yapılar elde edildiğini belirtmişlerdir. Bozkurt ve Boumerzough [8] yalın halde (HSS), CrN ve AlTiN kaplı takım malzemesi kullanarak sürtünme karıştırma kaynağını gerçekleştirmişler. Sabit dönme hızı ve iki farklı ilerleme hızı kullandıkları birleştirmelerde en iyi kaynak bağlantılarını AlTiN ile kaplanmış takımla elde etmişlerdir.

Pim geometrilerine bakıldığında yine çok farklı geometriler ile başarılı birleştirmeler yapılmıştır. Başak ve arkadaşları [9] sabit ilerleme hızı ve dönme hızı ile birleştirdikleri kaynakta altı farklı tipte pim kullanmışlardır. En uygun birleştirmeyi üçgen vidalı uç ile elde etmişlerdir. Ayrıca çekme dayanımı ve darbe dayanım özellikleri üzerinde takım omuz çapının levha kalınlığı oranına etkisini araştıran Nathan ve arkadaşları [10] 5 mm kalınlığında HSLA çeliğini sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. İlerleme ve dönme hızını sabit tutarak beş farklı omuz çapına sahip pim kullanmışlardır.

Başlangıçta düşük erime sıcaklığına sahip alüminyum ve alaşımları sürtünme karıştırma

kaynağıyla birleştirilmeye başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda hem pim geometrileri hem de farklı devir sayıları ve ilerleme hızlarında birleştirmeler yapılmıştır. Oluşan kaynak bölgelerinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Boz ve Kurt [11] Al 1080 alüminyum alaşımını farklı pim tasarımı kullanarak birleştirmişler ve kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. En iyi birleştirmeyi 0,85 ve 1,10 hatveli pim ile elde etmişlerdir. Elangovan ve Balasubramanian [12] AA6061 alüminyum alaşımının kaynağı için düz silindirik, konik silindirik, dişli silindirik, üçgen ve kare olmak üzere beş farklı pim üzerinde çalışmışlardır. Bu beş takım profilinden kare profilli takımın diğer takımlara göre kusursuz kaynaklar ürettiğini belirtmişlerdir. Şık ve arkadaşları [13] AA2024 alüminyum alaşımını üç farklı devir sayısı, iki farklı ilerleme hızında birleştirmişlerdir. En yüksek sertlik, en yüksek çekme dayanımı ve en yüksek eğme yorulma dayanımı değerlerini 1500 dev/dak-200 mm/dak parametresi ile kaynakladığı numunelerde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Sabit ilerleme hızı ve sabit devir sayısı ile AA5251 alüminyum alaşımını birleştiren Haşçalık ve arkadaşları [14] beş farklı pim geometrisi kullanmışlardır. En mukavemetli birleştirmeyi kare piramit geometrisine sahip pim ile gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir.

Daha sonra sürtünme karıştırma kaynağının alanı karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler ve polimerlerde dahil olmak üzere çeşitli materyallere kadar genişlemiştir [22]. Fujii ve arkadaşları [15] IF steel, S12C, S35C olmak üzere üç farklı karbon çeliğini farklı ilerleme hızları ve sabit devir sayısında birleştirmişlerdir. Birleştirme sonrası bu çeliklerin mekanik özellikleri ve mikroyapılarını incelediklerinde kaynak koşullarının her üç çeliği de önemli ölçüde etkilediklerini görmüşlerdir. AISI 1018 karbonlu çeliği birleştiren Lienert ve arkadaşları [16] en büyük takım aşınmasının tam ısınmamış soğuk metalin hareketi esnasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Bunu önlemek için ön ısıtma, düşük dalış değeri, ön delik uygulamaları yapılabileceğini belirtmişlerdir. Meran ve Canyurt [4] AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik plakaları

eşkenar üçgen uç profili kullanarak birleştirmişlerdir. Devir sayıları, ilerleme hızları, takım baskı kuvvetleri ve takım açılarının birleştirmeye etkisini araştırmışlardır. Maksimum mukavemeti 950 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızı, 9 kN'luk takım baskı kuvveti ve 1,5 derecelik eğim açısında elde etmişlerdir. AISI 304 plakayı Lakshminarayanan [17] ise konik uç profili kullanarak birleştirmiştir. Çalışmasında farklı ilerleme hızı, devir sayısı ve omuz çapı kullanarak optimum değeri elde etmeye çalışmıştır. En iyi sonuçları 441 dev/dak devir sayısı, 118 mm/dak ilerleme hızı ve 17,5 mm omuz çapında elde etmiştir. Yine AISI 304 çelik plakayı birleştiren Park ve arkadaşları [18] kaynak dikişinin mikroyapısını ve sigma fazı oluşumunu incelemişlerdir. Kaynak bölgesindeki iç yapının alüminyumda elde edilen yapıya benzediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sigma fazı oluşumuna rastlanmadığını belirtmişlerdir. Meran ve arkadaşları [19] birleştirdikleri AISI 304 paslanmaz çeliğinde kaynaklı bölgenin çekme mukavemetlerini, sertlik değerlerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Ayrıca takım dalma açısının kaynak dikişinde önemli bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Bilgin ve Meran [20] farklı kaynak parametreleri kullanarak birleştirdikleri AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde takım dönme ve ilerleme hızının etkilerini incelemişlerdir. İlerleme hızını sabit tutup devir sayılarını değiştirerek yaptıkları birleştirmelerde en iyi mekanik direnç değerini 1120 dev/dak devir sayısında elde etmişlerdir. Devir sayısını sabit tutup ilerleme hızlarını değiştirdiklerinde ise en iyi mekanik direnç değerini 125 mm/dak ilerleme hızında elde etmişlerdir. AISI 409 ferritik paslanmaz çeliği birleştiren Cho ve arkadaşları [21] birleştirme işleminde dışbükey karıştırıcı uç kullanmışlardır. Karıştırma bölgesinde oldukça ince taneli bir mikroyapı elde etmişlerdir.

Ayrıca bu gibi benzer (similar) metallerin yanı sıra benzer olmayan (dissimilar) metallerde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Çakır ve Çelik [23] Al 5754-Cu malzeme çiftini farklı takım dönme ve ilerleme hızlarında, 0 ve 1 mm takım

konumlandırması yaparak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Karıştırıcı ucu bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına 1 mm kaydırarak deneylerini gerçekleştirdiklerinde daha iyi mekanik değerler elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Kimapogon ve Watanabe [24], alüminyum alaşımı ile düşük karbonlu çelik plakayı birleştirmişlerdir. En iyi dayanıma sahip kaynak dikişlerini, tabandan 0,2 mm mesafede olduğu pim uzunluğunda elde etmişlerdir. Aghaei ve Dehghani [25], çalışmalarında, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen Monel 400 ve AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerine dönme ve ilerleme hızlarının etkilerini araştırmışlardır. Kusursuz kaynakları, ilerleme hızı 50 ila 100 mm/dak olan 400 dev/dak hızında elde etmişlerdir. Jafarzadegan ve arkadaşları [5], AISI 304 ile St37 çeliğini sabit ilerleme hızında, iki farklı takım dönme hızlarında ve takıma 3 derecelik açı vererek sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak mikroyapısı incelemişlerdir. Kaynak alanında ana metaller dışında dört farklı bölge bulmuşlardır. Yine Jafarzadegan ve arkadaşları [26], AISI 304 ile St37 çeliğini sabit ilerleme ve takım dönme hızında ve birleştirmişler, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve deformasyonun St37 karbon çeliğindeki östenitin yeniden kristalleşmesine sebep olduğunu, bu taneciklerin sürtünme karıştırma kaynağından sonra soğuyarak ince ferrit ve perlitte dönüştüğünü belirtmişlerdir. Metadinamik yeniden kristalleşmenin 304 paslanmaz çelik östenit tanelerinde oluştuğunu ve karıştırma bölgesinde tane küçülmesine neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Karıştırma bölgesinin sertliğinin, her iki çeliğin karıştırma bölgesinde tane küçülmesine bağlı St37 temel metalinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynağın, St37 çeliğine göre daha yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip

olduğunu ve enine çekme örneklerinin kırılmasının St37 çeliğinde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Sharma ve Dwivedi [27], tavlama işlemine tabi tuttukları yapı çeliği ve ferritik paslanmaz çeliği birleştirmişlerdir. Çekme deneyi sonrasında enine kaynak numunesinin gerilme mukavemetinin, yapı çeliği ana metalinden daha yüksek, ferritik paslanmaz çelik ana metalinden daha düşük olduğunu, boyuna kaynak numunesinin çekme mukavemetinin ise her iki ana metalden çok daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada, korozyona dayanıklı ve yüksek mukavemetli malzemeler olan östenitik paslanmaz çelikler (AISI 316) ile karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) uygun çalışma koşullarında kullanılmak üzere sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmişlerdir. Dolayısıyla düşük maliyetli ve ara yüzey uyumluluğu (mukavemet, sertlik, yüzey kalitesi) yüksek olan malzemeler elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, östenitik paslanmaz çelik (AISI 316) ve sade karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) üniversal freze tezgâhında 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızında birleştirilmiştir. Kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, en uyumlu kaynak çifti belirlenmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Çelik plakalar 3 mm kalınlığa, 60 mm genişliğe ve 120 mm uzunluğa sahiptir. Ana metallerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve karbonlu çeliklerin kimyasal bileşimi

Malzemeler	Kimyasal bileşim						
	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
AISI 316	0,03	16,967	10,023	-	0,993	-	-
AISI 1010	0,119	0,017	0,018	0,087	0,495	0,017	0,013
AISI 1030	0,306	0,029	0,025	0,026	0,512	0,032	0,018
AISI 1050	0,538	0,029	0,027	0,035	0,389	0,115	0,003
AISI 1070	0,659	0,029	0,024	0,049	0,559	0,019	0,02

Deneylerde kullanılan plakalara karıştırıcı ucun malzeme ile temasında yüke maruz kalmaması için birleşme noktasını ortalayacak şekilde 7 mm çapında bir delik açılmıştır. Şekil 1’de görüldüğü

gibi omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanılmıştır. Takım açısı $1,5^\circ$ ’dir.



Şekil 1. Tungsten karbür karıştırıcı uç

Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada paslanmaz çelik farklı devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılarak kendisi ile birleştirilmiş, 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki kaynak parametrelerinde malzemeler homojen olarak karışmış, optimum mekanik ve mikroyapı özellikleri elde edilmiştir. Deneylerin ikinci aşaması olan paslanmaz çelik-sade karbonlu çelik çiftlerinin kaynaklanmasına 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızı ile devam edilmiştir.

Kaynağın mekanik özellikleri, çekme, çentik darbe ve mikrosertlik deneyleri yapılarak incelenmiştir. Çekme deneyleri için numunelere, 1 mm/dak’lık çekme hızı ile çekme kuvveti uygulanmıştır.

Mikrosertlik incelemesi sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgelerinden alınan metalografi numunelerinin kaynak bölgesi boyunca normal metal, ısıdan etkilenmiş kaynak metali bölgesi olarak 1,5 kg yük altında 15 sn bekletilerek, 1 mm aralıklarla ilerletilip mikrosertlik testine tabi tutularak yapılmıştır. Çentik darbe deneyi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Kaynağın mikroyapısı Optik Mikroskop (OM, Nikon Eclipse L150) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, TESCAN MIRA3 XMU) ile incelenmiştir. Optik Mikroskopta incelemek için ilk önce kaynaklı numuneye zımparalama ve parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra %65’lik nitrik asitten (HNO₃) 5 ml, %99,6’lık saf alkolden 95 ml karıştırılarak 100 ml’lik stok dağlama çözeltisi

hazırlanmıştır. Daldırma usulüyle 3 sn tüm numune daldırılıp bekletilerek derhal saf su ve alkol ile temizlenmiştir. Kurulandıktan sonra mikroskopta incelenmek üzere hazır hale getirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemeler hem yüzey morfolojisi, hem elementel dağılım için hem de çekme, çentik darbe ve kayma deneylerine tabi tutulduktan sonra bu deneylerden elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

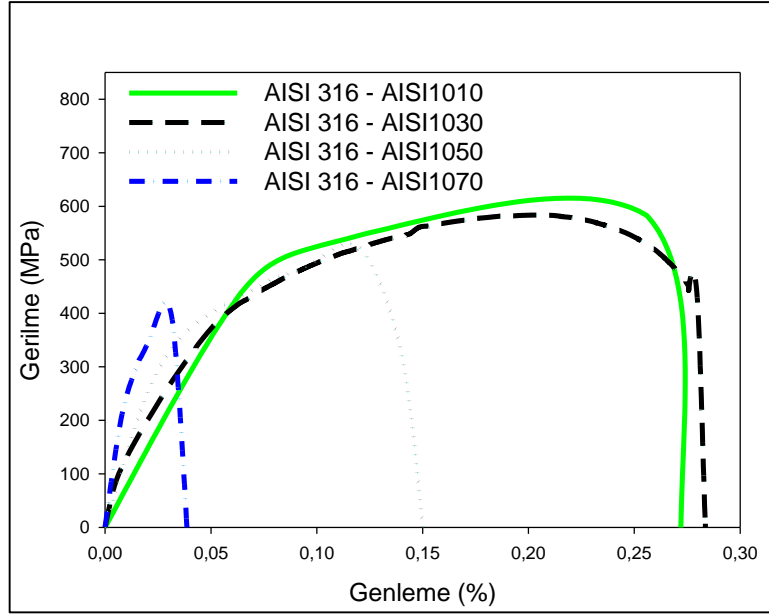
Kaynak esnasında ısınma soğuma şartlarından dolayı oluşabilecek yeni fazlar ve Fe için genlemeden dolayı oluşacak faz kaymaları ve safsızlıkların da faz analizi X ışınları difraksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

3.1. Mekanik Deney Sonuçları

3.1.1. Çekme Deneyi

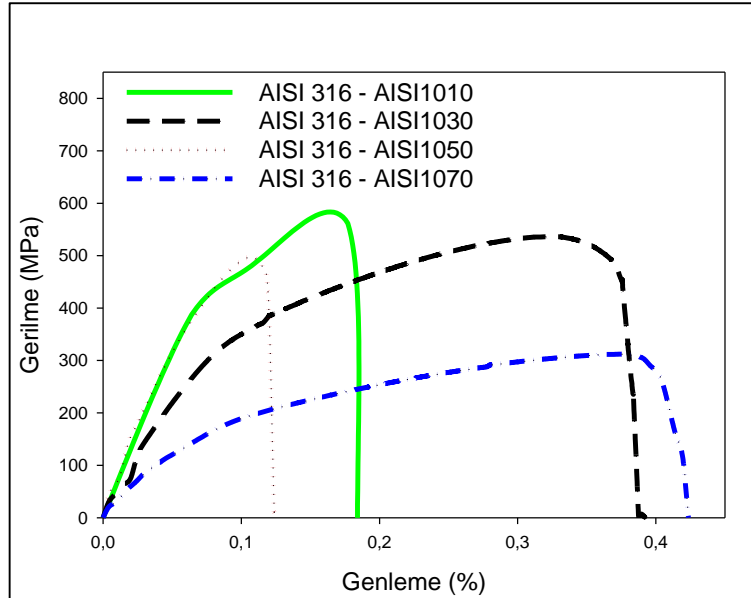
AISI 316-AISI 10X0 serisi çekme değerleri Şekil 2’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde çekme gerilmesi 618,81 MPa değerine sahip AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin en iyi çekme değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunu 583,58 MPa çekme gerilmesi değeri ile AISI 316-AISI 1030 kaynak çifti, daha sonra 532,69 MPa çekme değeri ile AISI 316-AISI 1050 kaynak çifti takip etmektedir. Son olarak 423,79 MPa çekme gerilmesi ile AISI 316-AISI 1070 kaynak çifti en düşük çekme gerilmesi değerine sahiptir.



Şekil 2. AISI 316-AISI 10X0 serisi çekme değerleri

AISI 316-AISI 10X0 serisi kayma gerilmesi değerleri Şekil 3'te görülmektedir. Grafikler incelendiğinde en iyi kayma gerilmesi değeri AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftine ait olup 582,74 MPa'dır. Bu değeri 529,52 MPa ile AISI 316-AISI

1030 kaynak çifti ve 498,03 MPa kayma gerilmesi değeri ile AISI 316-AISI 1050 kaynak çifti izlemektedir. Çekme gerilmesi değerinde olduğu gibi en düşük kayma gerilmesi değeri AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftine ait olup 311,94 MPa'dır.



Şekil 3. AISI 316-AISI 10X0 serisi kayma değerleri

Çekme ve kayma gerilmesi değerlerine baktığımızda AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin en yüksek, AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin en düşük gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

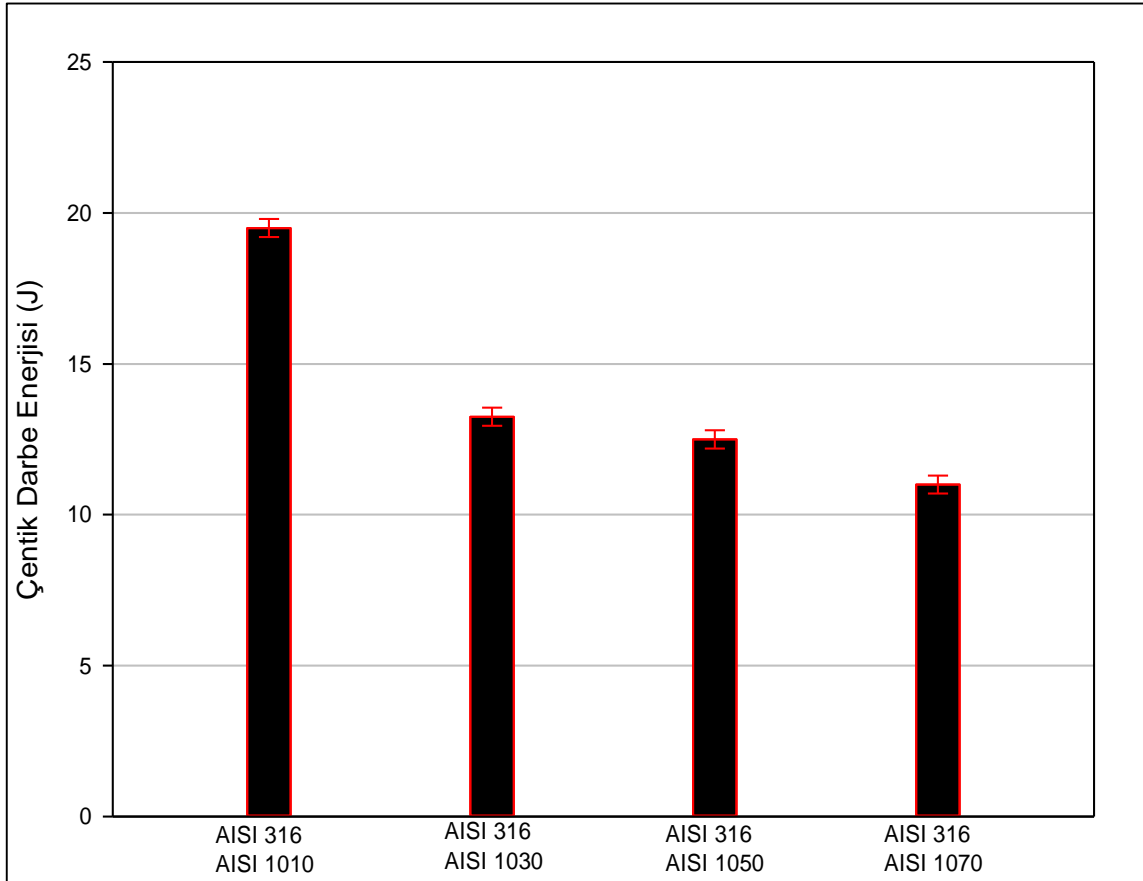
En düşük gerilme değerine sahip olan AISI 1070 karbonlu çeliğinin diğer karbonlu çeliklere göre karbon oranının fazla olması nedeniyle perlitik yapıya en yakın çeliktir. İçerisinde daha fazla karbon içermesinden dolayı elementlerin geçişine izin vermemesi sebebiyle mekanik tutunmasının diğer karbonlu çeliklere göre daha kötü olduğu, bu nedenle en düşük mukavemetinde bu kaynak çiftinde çıktığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan AISI 316 çeliğinin yüksek miktardaki alaşım elementine karşılık AISI 1010

karbonlu çeliğinde alaşım elementinin olmaması, 1010 çeliğine difüze olan element miktarını attırmaktadır. Aynı zamanda 316 ve 1010 çeliklerinin sertliklerinin hemen hemen aynı olması ve 1010 çeliğinin içine difüze edebilen element miktarının fazla olması nedeniyle AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin mukavemetinin diğer kaynak çiftlerine göre daha iyi çıktığı düşünülmektedir.

3.1.1. Çentik Darbe Deneyi

AISI 316-AISI 10X0 serisinde 19,5 J ile en yüksek kırılma enerjisine sahip AISI 316-AISI 1010 çelik çifti diğerlerine göre daha sünek davranış göstermektedir. Şekil 4'te çentik darbe deney sonuçları grafik halinde verilmiştir.

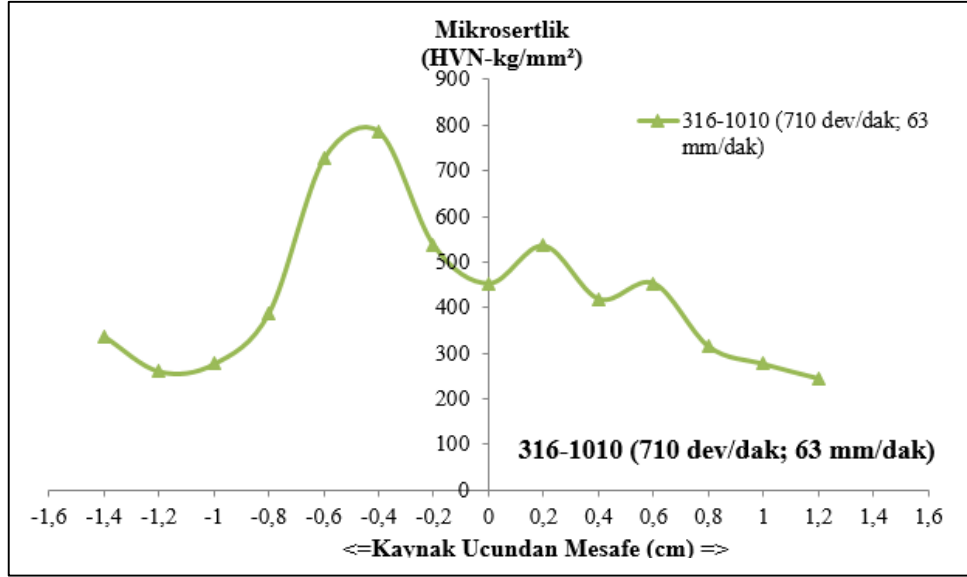


Şekil 4. Çentik darbe deney sonuçları grafikleri

3.1.2. Mikrosertlik Deneyi

Şekil 5'teki grafikte her iki tarafın 1 cm civarındaki yerlerinde kaynak bölgesi oluşmuştur. Bu bölgenin solunda ve sağında malzemelerin kendi sertliklerinin olduğu görülmektedir. Orta bölgedeki

2 cm'lik kısımdaki kaynak bölgesinde intermetalik birikme ve Fe-Cr, Fe-Ni ve Cr-Ni alaşımın sertleşmesinden dolayı kaynak bölgesindeki sertliğin yükseldiği görülmektedir. 316-1010 çeliklerinin sertlikleri 550-780 kg/mm² seviyelerindedir.



Şekil 5. 316-1010 çelik çiftinin mikrosertlik değeri

3.2. Mikroyapı Deney Sonuçları

Mikroyapı deney sonuçlarında kaynaklı bölgeler optik mikroskopta, çekme, kayma ve çentik darbe deneylerinden elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiş ve XRD ile faz analizleri yapılmıştır.

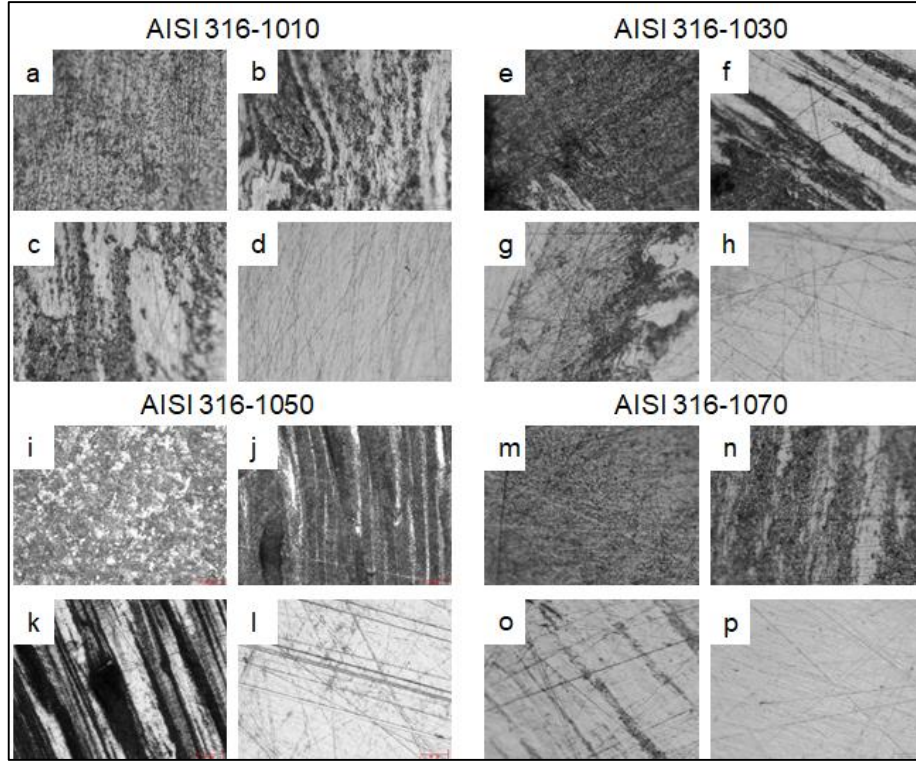
3.2.1. Optik Mikroskop

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta incelenmiştir. Şekil 6'da AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

AISI 1010 çeliğinin görüldüğü Şekil 6.a'da koyu gri görünen yerlerin perlit, açık renkte görülen yerlerin ise ferrit olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.b'de paslanmaz çelikten karbonlu çeliğe doğru karıştırma bölgelerinin olduğu kaynak bölgesinin

orta kısmı görülmektedir. Şekil 6.c'de paslanmaz çeliğin içerisine karbonlu çelikteki perlit ve ferritin gruplar halinde karıştığı görülmektedir. Şekil 6.d'de ise yapının tamamen paslanmaz çelik olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 6.e'de AISI 1030 karbonlu çelik görülmekte, Şekil 6.f'de kaynak bölgesine doğru ilerledikçe paslanmaz çeliğin içerisinde 1030 karbonlu çeliğin varlığı göze çarpmaktadır. Burada yüksek miktarda Krom ve Nikel içeren paslanmaz çelik ile karbonlu çelikte fazların birbiri içinde çözünmediği gözlemlenmektedir. Ayrıca yüzeyde siyah renkte görülen bölgelerin ısıdan dolayı çökelmiş karbür partiküllerinin olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.g'de karıştırıcı ucun dönmesinden kaynaklı malzemeler birbiri içine akmış durumda, orta kısımların 1030, kenarların ise paslanmaz çelik olduğu, Şekil 6.h'de ise paslanmaz çelik yapı görülmektedir.



Şekil 6. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 6.i'de beyaz renklerde görünen bölgelerin ferrit, koyu gri-siyah görünen bölgelerin perlite olduğu AISI 1050 çeliği görülmektedir. Yapısında 0,5 oranında karbon içeren AISI 1050 yaklaşık %35 içeren ferrit, yaklaşık %65 oranında perlite içermektedir. Şekil 6.j'de karbonlu çelik tarafından kaynak bölgesine girildiğinde ferrit miktarının azaldığı, perlite miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca bloklar halinde görülen beyaz renkler kalıntı ostenit varlığını göstermektedir. Kaynaklı bölge 800-900 °C gibi yüksek sıcaklıklardan aniden 723 °C'nin altına düştüğünde ostenit fazı dönüşemeyip, kalıntı ostenit olarak yüksek gerilimli bölgelerin perlite plakaları arasında kalmasına ve böylece genlemenin de düşük olması ile düşük uzama göstermesine neden olmuştur. Kaynağın orta noktasına gelindiği Şekil 6.k'da yapıda beyaz ve hiç dağlanamamış paslanmaz çeliğin varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca paslanmaz çeliğin yanında perlite miktarı fazlaşmış, ferrit ise azalmıştır. Şekil 6.l'de yapının tamamen paslanmaz çelik olduğu görülmektedir.

Şekil 6.m'de kaynaklı 1070 karbonlu çeliği, Şekil 6.n'de ise 1070 çeliğinden kaynak bölgesine geçiş görülmektedir. Burada karbonlu çeliğin içerisinde yer yer paslanmaz çeliğin varlığı görülmekte olup kaynağın orta bölgesi olan Şekil 6.o'da ise yapıda daha fazla paslanmaz çelik ve bu çeliğin içerisinde blok blok 1070'in olduğu göze çarpmaktadır. 1070 çeliğinin yüksek miktarda karbon içermesinden dolayı sert olması ve bunun sonucunda 316 paslanmaz çeliğinin 1070 karbonlu çeliğini deforme edememesi sebebiyle malzeme akışının olmadığı düşünülmektedir. Şekil 6.p'de ise 316 paslanmaz çeliği görülmektedir.

3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu

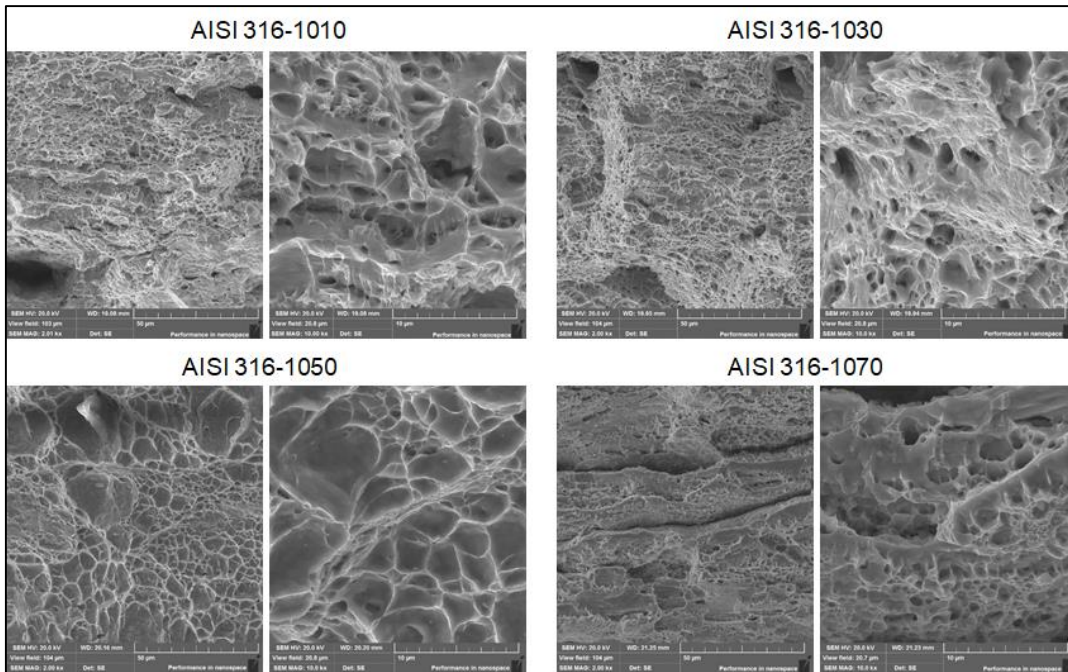
Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin çekme, kayma ve çentik darbe deneyleri sonrası oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir.

3.2.2.1. Çekme Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Şekil 7’de AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çekme deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinde görüldüğü üzere içeriden oluşmaya başlayan çekme boşlukları aracılığıyla malzemedeki iç yüzey alanının düştüğü ve sünek kırılma oluştuğu gözlemlenmiştir. Tane morfolojileri genellikle fiber yapılı olup yüksek miktarda süneklik gösteren tanelerle birlikte klivaja sahip olan tanelerde görülmektedir. Isıdan etkilenen bölge civarında meydana gelen kopma hem kısmen büyümüş ve yeniden kristalleşmiş taneler hem de küçük ve sünen taneler içermektedir.

AISI 316-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM analizine baktığımızda, tane içerisinde çukurların oluştuğu görülmektedir. Bu çukurların büyüyerek malzemeyi deformasyona uğrattığı ve kırılmaya maruz bıraktığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1050 kaynak çiftinin kırık yüzeyleri incelendiğinde büyümüş taneler görülmektedir. Büyümüş tanelerde sünekliği azalttığı için tanenin şekil değiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkiler ve kırılma olayını hızlandırır. Bu çelik çiftinin tane büyüklüğünün genellikle AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda da AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha az sünek olduğu ve daha çabuk kırıldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çekme deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin kırık yüzeyleri incelendiğinde, yüksek sertlik ve mukavemetten dolayı kaynak bölgesinde olan daralma diğer çelik çiftlerine nazaran daha az görülmüştür. Yüksek sıcaklıktan dolayı taneler aşırı büyümüş ve soğurken çekmesinden dolayı da gözenek oluşumu

gözlemlenmiştir. Delaminasyona bağlı olarak kaynak yüzeyinden 1mm içeride karıştırma ısısından dolayı yüksek sıcaklıkla büyümüş aşırı taneler ve plakanın kalınlığı doğrultusunda aşağı yönlü aşırı büyümüş taneler oluştuğu gözlemlenmiştir.

3.2.2.2. Kayma Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

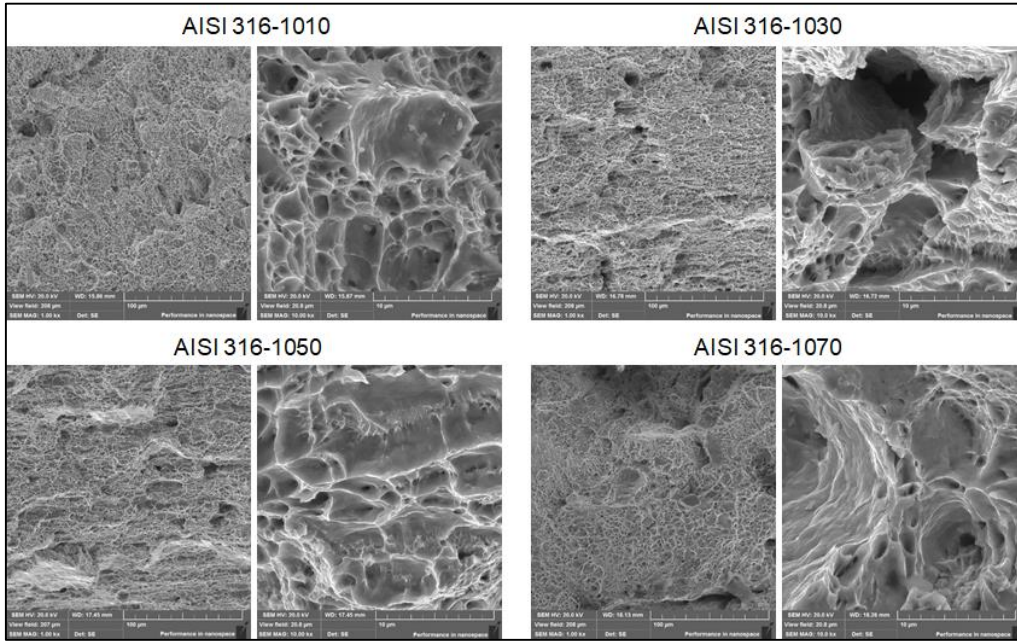
Şekil 8’de AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin kayma deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. AISI 316-AISI 1010’da küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. Çekme boşluklarının birleşerek büyüdüğü ve alan azaltarak düşük genleme ile kısmi sünek şekilde kırıldığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1030 çelik çiftine baktığımızda deformasyon çatlakları, sünek taneler, sünek tanelerin dinamik olarak yeniden kristalleşmesi ile büyümüşür. Her birinde çekme boşluğu olduğu

gözlemlenmiş ve büyüyen çekme boşlukları yüksek çatlak enerjisi oluşturmuştur. Bu ise yapıda sünek-gevrek kırılma özelliklerini göstermiştir.

AISI 316-AISI 1050 çelik çiftine baktığımızda, küçük tanelerin yanı sıra blok blok büyük taneler görülmektedir. Yer yer küçük çatlaklarında olduğu, bu çatlakların büyüyerek gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinde sünek küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. AISI 1050 de olduğu gibi çatlakların büyüyerek gevrek kırılmalara neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin kayma deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

3.2.2.3. Çentik Darbe Deneyleri Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Şekil 9’da çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri görülmektedir.

AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin deformasyonun başlangıcında yüksek enerji ile gevrek tipte kırılma

oluşturduğu düşünülmektedir. Daha sonra bu yüksek enerjinin ısıdan etkilenmeyen küçük taneler tarafından absorbe edilerek çatlak ilerlemesini biraz yavaşlattığı ve böylece kırılma enerjisinin yüksek değerlerde olduğu düşünülmektedir.

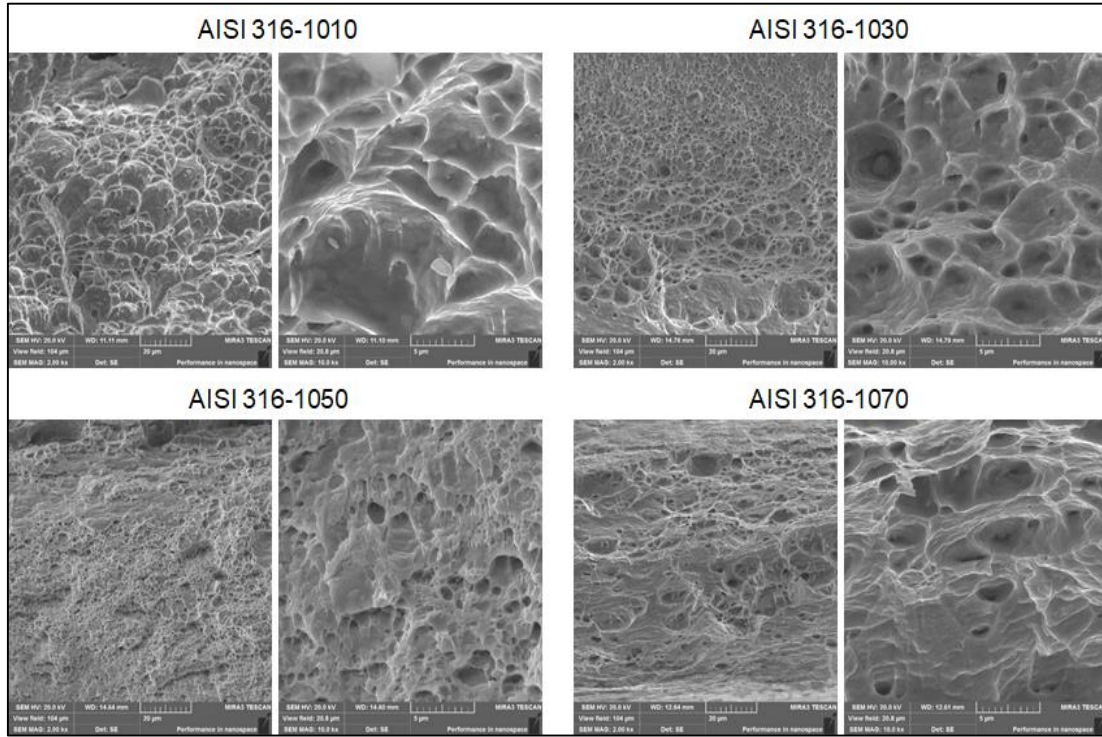
AISI 316-AISI 1030’da çatlak ilerlerken sürekli küçük taneli yapılara denk gelmiş ve bu ise çatlak

enerjisini durdurucu yönde rol oynamış ve çekme boşluklarına benzer sünme bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Çatlak büyüdüktan sonra iç yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgelere denk gelen çatlak ucunun büyük tanelerin genlememesi nedeniyle kırılmaya uğradığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1050 kaynaklanmış çelik çiftinde, malzemenin sertliğindeki ve mukavemetindeki

artıştan dolayı ve yapıda yüksek sıcaklıkla birlikte meydana gelmiş büyük tanelerin zor genlemesinden dolayı darbe enerjisinde de düşüş gözlenmiştir.

AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftine baktığımızda, darbe enerjisinden sonra etkili olan çatlak enerjisinin, malzemenin mukavemeti ve sertliğinden dolayı gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.

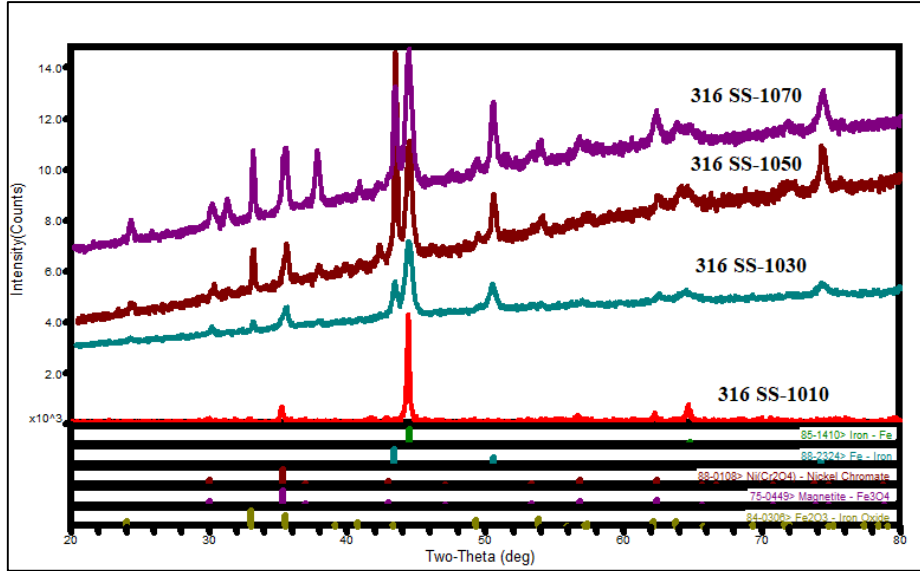


Şekil 9. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

3.2.3. X Işını Difraksiyonu

Şekil 11’de XRD desenlerinden görüldüğü üzere, AISI 1010 ile kaynaklanan 316 paslanmaz çelik, 1010’un ferritik yapısından dolayı HMK kristal kafeste bulunmaktadır. Bu fazda tane büyümesi çok az ve kalıntı östenit miktarı çok düşük seviyededir. Karbon miktarının artması ile YMK kristal kafesi yine 43.8° ’de (111) piki ile kendini göstermekte ve artan C oranlarında çok yüksek miktarda YMK kafes yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da

316 östenitik paslanmaz çeliğinin 10X0 karbonlu çelik serisine kaynaklanabilirliğinde karışma problemleri ile birlikte mukavemette ve sertlikte düşüşler gözlenmesi olasıdır. Sertlik çok fazla malzeme yapısından etkilenmezken, özellikle mukavemetin düşmesinin sebebinin kalıntı östenit miktarındaki artış ve iç gerilmeler olduğu, bunların da yapıda uyumsuzluklara sebep olarak büyük tane-küçük tane ayrımını meydana getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 10. AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu makalede AISI 316 paslanmaz çeliği ile sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. En uyumlu kaynak çiftini belirlemek amacıyla mekanik ve mikroyapı analizleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda;

- 1) 710 dev/dak ve 63 mm/dak ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerine yapılan mekanik testlerden (çekme, çentik darbe, sertlik, kayma) ve mikroyapı analizlerinden en iyi sonuçların AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinde olduğu ortaya çıkmıştır. Mekanik testlerde en yüksek çekme gerilmesi değeri 618,81 MPa, en yüksek kayma gerilmesi değeri 582,74 MPa ile AISI 316-AISI 1010 çelik çifti için bulunmuştur.
- 2) Kırılma enerjileri incelendiğinde AISI 316-AISI 1010'un 19,5 J ile en yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu tespit edilmiş, dolayısıyla bu çelik çiftinin diğerlerine göre daha sünek olduğu belirlenmiştir.

- 3) Mikroyapı analizlerinde SEM ve OM sonuçları irdelendiğinde tane boyutunun ve plakaların delaminasyonunun, malzeme mukavemeti ve sertliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu numunelerde özellikle tane büyümesinin olduğu yerlerde düzensizliklerle birlikte mukavemetin de düştüğü gözlemlenmiştir. Küçük tane boyutuna ve sürekli dikişe sahip kaynakların daha yüksek çekme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Farklı Standartlarda Sürtünme Karıştırmalı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerin ve Mikroyapıların İncelenmesi" adlı TÜBİTAK 118M791 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Cam, G., Mistikoglu, S., 2014. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 23(6), 1936-1953.

2. Thomas, W.M., Threadgill, P.L., Nicholas, E.D., 1999. Feasibility of Friction Stir Welding Steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6), 365–372.
3. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering R.*, 50, 1–78.
4. Meran, C., Canyurt, O.E., 2010. Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steels. *The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 432-439.
5. Jafarzaghan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J., Assadi, H., 2012. Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding Between 304 Stainless Steel and st37 Steel. *Materials Characterization*, 74, 28–41.
6. Aktarer, S.M., Sekban, M., Küçükömeroğlu, T., 2015. IF Çeliği ile AA6061 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliği. *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 20-21 Kasım 2015, 435-445.
7. Reynolds, A.P., Tang, W., Gnaupel-Herold, T., Prask, H., 2003. Structure, Properties, and Residual Stress of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds. *Scripta Materialia*, 48, 1289–1294.
8. Bozkurt, Y., Boumerzoug, Z., 2018. Tool Material Effect on the Friction Stir Butt Welding of AA2124-T4 Alloy Matrix MMC. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1), 29–38.
9. Basak, H., Kayır, Y., Turkyilmaz, E.H., 2018. Experimental Investigation of the Different Stirring Pin Forms Caused Force and its Effects of Joining on Friction Stir Welding. *El-Cezeri Science and Engineering Journal*, 4(2), 249–257.
10. Ragu Nathan, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A.G., 2016. Effect of Tool Shoulder Diameter on Stir Zone Characteristics of Friction Stir Welded HSLA Steel Joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(10), 1861-1869.
11. Boz, M., Kurt, A., 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process. *Materials & Design*, 25, 343-347.
12. Elengovan, K., Balasubramanian, V., 2008. Influences of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA6061 Aluminium Alloy. *Materials & Design*, 29, 362-373.
13. Sık, A., Ertürk, I., Onder, M., 2010. A Study into Effects of Different Parameters on Mechanical Properties in Friction Stir Welding of AA 2024 Aluminium Alloy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(2), 139-147.
14. Hascalık, A., Caydas, U., Unal, E., Karaca, F., 2007. The Effect of tip Geometry on the Friction Stir Selding of AA 5251 Alloy. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 4, 1-7.
15. Fujii, H., Cui, L., Tsuji, N., Maeda, M., Nakata, K., Nogi, K., 2006. Friction Stir Welding of Carbon Steels. *Materials Science and Engineering: A.*, 429, 50-57.
16. Lienert, T.J., Stellwag, W.L., Grimmet, B.B., Warke, R.W., 2003. Friction Stir Welding Studies on Mild Steel Tool Durability and Steel Microstructure. *Supplement to the Welding Journal*, 1S-9S.
17. Lakshminarayanan, A.K., 2016. Enhancing the Properties of Friction Stir Welded Stainless Steel Joints Via Multi-criteria Optimization. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 605-617.
18. Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., Inagaki, M., 2003. Rapid Formation of the Sigma Phase in 304 Stainless Steel During Friction Stir Welding. *Materials Science*, 49, 1175-1180.
19. Meran, C., Kovan, M., Alptekin, A., 2007. Friction Stir Welding of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering Technology*, 38(10), 829-835.
20. Bilgin, M.B., Meran, C., 2012. The Effect of Tool Rotational and Traverse Speed on Friction Stir Weldability of AISI 430 Ferritic Stainless Steels. *Materials & Design*, 33, 376-383.
21. Cho, H.H., Han, H.N., Hong, S.T., Park, J.H., Kwon, Y.J., Kim, S.H., Steel, R.J., 2011. Microstructural Analysis of Friction Stir Welded Ferritic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering: A.*, 528(6), 2889-2894.

22. Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H., 2008. Recent Advances in Friction-Stir Welding -Process, Weldment Structure and Properties. *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023.
23. Cakır, R., Celik, S., 2018. Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al 5754-Cu. *El-Cezeri Science and Engineering Journal*, 4(1) 82–91.
24. Kimapong, K., Watanabe, T., 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel. *Welding Journal*, 83(10), 277S-282S.
25. Aghaei, A., Dehghani, K., 2015. Characterizations of Friction Stir Welding of Dissimilar Monel400 and Stainless Steel 316. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 573–579.
26. Jafarzadegan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J., Assadi, H., 2013. Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld Between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 29(4), 367–372.
27. Sharma, G., Dwivedi, D.K., 2017. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Steel Joint Developed Using Friction Stir Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1299–1307.

The Investigation of Corrosion Performance and Durability of Hydroxyapatite-Coated Titanium Implants and the Effect of Antibiotic Additives

Demet YAZICI¹, Nilgün ALPAY², Başak DOĞRU MERT^{*3}

¹Adana City Training and Research Hospital, Ear Nose and Throat Department, Adana

²Çukurova Üniversitesi, The Faculty of Dentistry, Adana

³Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Energy Systems Engineering Department, Adana

Geliş tarihi: 06.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

In this study, amoxicillin and potassium clavulanate were loaded as antibiotic additives to hydroxyapatite coating (L-HAP) and were used to enhance biocompatibility and corrosion resistance of titanium (Ti) *in-vitro* conditions. Coating was achieved using the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) process. Scanning electron microscopy (SEM) images, energy dispersive X-ray (EDX) analysis, atomic force microscopy (AFM) images, X-ray diffraction (XRD) analysis, and attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) were used to determine the surface morphology. The corrosion test was performed using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and polarization curves in artificial saliva at 310 K. Furthermore the quantum chemical parameters of amoxicillin and potassium clavulanate were investigated and associated with the adsorption ability of these molecules. Results revealed that the corrosion performance of Ti was improved by L-HAP, which had a lower anodic current density and better corrosion resistance. This situation dealt with the more durable, compact film that had been produced on the surface.

Keywords: Artificial saliva, Biocompatibility, SILAR, Titanium

Hidroksiapatit Kaplı Titanyum İmplantların Korozyon Performansı ve Dayanıklılığının ve Antibiyotik Katkı Maddelerinin Etkisinin Araştırılması

Öz

Bu çalışmada, hidroksiapatit kaplamaya (L-HAP) antibiyotik katkı maddesi olarak ilave edilen amoksisilin ve potasyum klavulanat, *in-vitro* koşullarda titanyumun (Ti) biyoyumluluğunu ve korozyon direncini arttırmak için kullanılmıştır. Kaplama, Ardışık İyonik Katman Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) yöntemi ile gerçekleştirildi. Yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) analizi, X-ışını kırınımı (XRD) analizi, azaltılmış toplam yansıma-Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ATR- FTIR) ile belirlendi. Korozyon testleri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve polarizasyon eğrileri yardımıyla 310 K'de yapay tükürük çözeltisinde elde edildi. Ayrıca amoksisilin ve potasyum klavulanatın kuantum kimyasal parametreleri araştırıldı ve bu moleküllerin adsorpsiyon yeteneği ile ilişkilendirildi. Sonuçlar, Ti'nin korozyon performansının, daha düşük anodik akım yoğunluğuna ve daha iyi korozyon direncine sahip olan L-HAP ile iyileştirildiğini ortaya koydu. Bu durum, yüzeyde üretilen daha dayanıklı, kompakt film ile ilişkilendirildi.

Anahtar Kelimeler: Yapay tükürük, Biyoyumluluk, SILAR, Titanyum

*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Başak DOĞRU MERT, bdogrumert@atu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ – HAP) and titanium (Ti) are well-known and commonly used biomaterials due to high biocompatibility and physical properties [1-9]. Especially in the bone reconstructive surgery and prosthetic treatments, surgeons prefer these materials because after surgical operation, Ca^{2+} and PO_4^{3-} ions may be released and absorbed to gain repair of tissues. Furthermore titanium exhibits high corrosion resistance and it has a crucial effect for human health. The corrosion happens when metals and their compounds react with their environment chemically or electrochemically and get degraded and damaged by forming oxides, hydroxyoxides and other compounds. More critically, these corrosion products have the ability to permeate tissues, causing damage to human cells. The fluids in the human body consist of water, soluble oxygen, proteins and various ions like chloride, hydroxide and etc. For this reason, the human body is an extremely corrosive environment for the metals used as biomaterials [10,11]. This corrosive environment reduces the strength of metals. One of the solutions for preventing corrosion of these metals is coating these materials with corrosion-resistant coatings as hydroxyapatite [12-17]. Therefore several scientists have been studied in this field and very impressive applications were presented. Wang et al. developed an organ-like MXene- Ti_3C_2 material that was used to immobilize hemoglobin and design & create a mediator-free biosensor with an oxidized surface. [1]. Electrochemical deposition of hydroxyapatite on a pure Ti substrate was used to measure corrosion resistance in a simulated body fluid (Hank's balanced salt solution). The findings revealed that it is a biomaterial that is reasonably appropriate for bone implantation [2]. The Ag deposited HAP coatings were produced and applied on anodized Ti, due to enhance corrosion resistance of material [3]. Mirzaee et al. [3] declared that the sample with content of Ag (0.05 molar ratio) had high corrosion resistance and further showed good antimicrobial efficiency (almost 99% reduction in viable cells). In the study of Coskun et al. [4] bio-metallic CoCrMo alloys were coated with hydroxyapatite at various pH and corrosion performance of the layers was determined. Results showed that pH influenced the

properties of layers (chemical composition and surface morphology) and at high pH, HAP coating exhibits more homogeneous structures and high corrosion resistance [4]. Gopi et al. claimed that carbon nanotubes (CNT) enhance strength and toughness of HAP. The addition of 1% CNT to HAP enhanced the coating's corrosion resistance and biomechanical properties [18]. Usinskas et al. [19] applied calcium titanate sub-layers and produced HAP coating on Ti with the help of sol-gel method further they obtained pre-heating some samples. According to the results, the morphology of the HAP thin films was not affected by surface alteration of the Ti substrate, but, contact angle measurements revealed that raising the number of HAP layers from 20 to 30 resulted in hydrophilic activity. Consequently many researches [15-31] showed that the biocompatibility and corrosion properties of HAP coating on Ti biomaterials could be enhanced but the main phenomenon was "accelerating healing process in treatment". For this purpose antibiotic additives (amoxicillin and potassium clavulanate) were used while preparing HAP coatings. Because of the ease of the technique, the SILAR procedure was used for application. Then surface morphology and corrosion properties were clarified with SEM, EDX, AFM, XRD analysis and electrochemical techniques.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. The Production of L-HAP Films

The titanium (Ti) sheet (it is known that Ti is preferred in dentistry applications) with a thickness of 0.25 mm (99.7% purity), was purchased from Sigma-Aldrich. This Ti sheet was cut 1x1 cm. The amoxicillin (Figure 1a) and potassium clavulanate (Figure 1b) were purchased from Sigma-Aldrich. CaCl_2 and $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ were purchased from Merck. The Ti was cleaned using 0.1 M HCl, acetone and double distilled water for 1 min. each in ultrasonic bath. Then HAP films were deposited as mentioned below: Ti sheets (1x1 cm) were immersed into 0.1 M CaCl_2 and kept there for 30 s. Then immediately immersed into distilled water for 30 s and then immersed into 1 mg/mL amoxicillin + 1 mg/mL potassium clavulanate + 0.05 M $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ and kept there for another 30 s

after being taken out from the bath. This process is called to be one SILAR cycle. Due to get a reasonably thick film (almost 10 μm), the cycle has to be repeated 50 times at room temperature

2.2. Characterization of L-HAP Films

Scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) were used to study the surface morphology of electrodes. A Carl Zeiss Evo 40 SEM was used to obtain the SEM images. The Park SYSTEMS instrument was used to obtain the AFM images. The chemical composition was determined by energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) which is part of SEM device. ATR-FTIR spectroscopy was used to evaluate the chemical composition of L-HAP. The X-ray diffraction (XRD) pattern was recorded on a Bruker AXS D8 with $\text{CuK}\alpha$ radiation ($\lambda = 0.15406 \text{ nm}$) in the 2θ range of $10\text{--}90^\circ$.

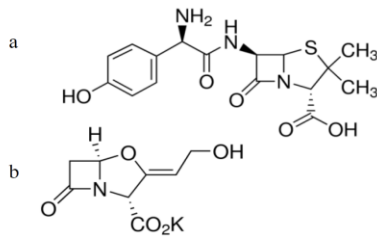


Figure 1. The molecular structure of amoxicillin (a) and potassium clavulanate (b)

2.3. Electrochemical Measurements

The corrosion tests were performed at 310 K, which was body temperature, open to the atmosphere, using a CHI 604D A.C. electrochemical analyzer

(R0633). The counter electrode was a platinum sheet with a surface area of 2 cm^2 and the reference electrode was an Ag/AgCl (3 M KCl) electrode. The corrosion performance of electrodes were investigated in artificial saliva. The composition of artificial saliva was given below [11]: 0.4 g/L NaCl, 0.4 g/L KCl, 0.6 g/L CaCl_2 , 0.54 g/L NaH_2PO_4 and 1 g/L urea (pH: 6.6). The EIS (electrochemical impedance spectroscopy) experiments were conducted in the frequency range with high limit of 100 kHz and low limit of 0.01 Hz. The amplitude was 0.005 V. The polarization curves were potentiodynamically obtained between 1.30 and 1.75 V with a scan rate of 1 mV s^{-1} .

3. RESULTS AND DISCUSSION

In Figure 2a, the SEM micrograph of L-HAP coated Ti surface is demonstrated. As seen in Fig. 2a, the electrode surface is nodular and narrow porous areas are seen between nodules. Usinskas et al. [19] present nodular views for HAP on Ti without initial pre-heating. According to Gopi et al. [25], the presence of pores on the HAP composite coating is advantageous for the initiation of bone formation by providing an excess of sites for osseous tissue growth. Rafieerad et al. [29] claimed that porous and nodular morphology enhances osteoblast adhesion, proliferation and accelerates the healing process and promotes bone mineralization. Therefore this new L-HAP coating should be suitable for surgical operations. Due to figure out contribution of antibiotics to HAP layer EDX analysis is present in Figure 2b. %16.8 C is proved that amoxicillin and potassium clavulanate loaded in HAP [25].

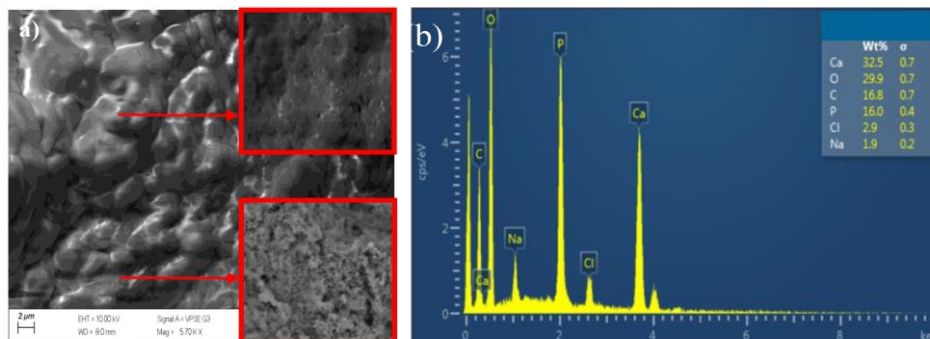


Figure 2. SEM micrographs (a) and EDX spectrum (b) of Ti/L-HAP

In Figure 3, the AFM results of L-HAP coated Ti surface is presented. 2D image (Figure 3a) correlated the SEM micrograph. The nodular structures and blackberry type shapes are seen in Figure 3b. According to section analysis (Figure 3c), the average surface porosity of L-HAP is almost 240 nm. The adhesion of coating increase with increasing roughness and porosity [32] therefore L-HAP coating may increase osteoblast adhesion.

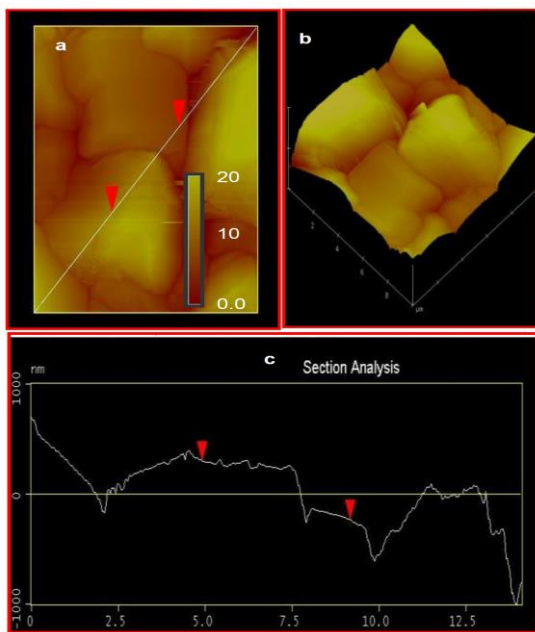


Figure 3. 2D (a), 3D (b) AFM images, and sectional analysis (c) of Ti/L-HAP (scan size: 10 μ m \times 10 μ m, scan rate: 1.001 Hz)

The ATR-FTIR spectrum of L-HAP is presented in Figure 4, PO₄³⁻ group of HAP is seen at 560.08 cm⁻¹, wagging mode of NH₂ of amoxicillin and ν_4 mode of PO₄³⁻ are obtained at 600 and 601.81 cm⁻¹. Jankovic et al. [17] presented almost same results for HAP and declared that vibrational bands at 601 and 560 cm⁻¹, corresponding to the ν_4 mode of PO₄³⁻ group. Indira et al. [31] enounced that ν_3 mode of PO₄³⁻ group is seen at 1030 cm⁻¹ and in this study it is detected at 1021.10 cm⁻¹. Secondary amine peak of potassium clavulanate and amoxicillin is seen almost 1412.82 cm⁻¹ and stretching of N-H and O-H is obtained at 3378.86

cm⁻¹. Furthermore, ν aromatic (C-H) is seen almost 1100.50 cm⁻¹ and bending mode of OH is obtained at 1650 cm⁻¹. The ν_3 and ν_4 mode of PO₄³⁻ group and O-H bond of carboxylic acid group is seen at 3735.07 cm⁻¹ [33-35]. Consequently, Figure 4 proved that amoxicillin and potassium clavulanate loaded to hydroxyapatite coating.

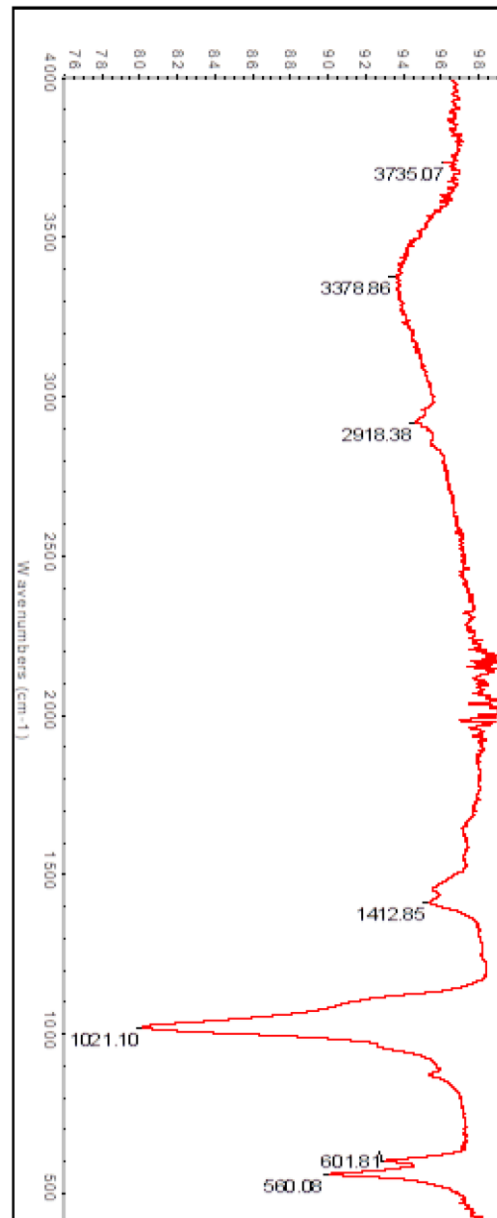


Figure 4. FTIR spectra of L-HAP

The XRD pattern of Ti/L-HAP is given in Figure 5. The peaks at 32.18° , 32.58° and 46.78° are assigned to (112), (300) and (222) planes of HAP, respectively. The peaks at 36.24° , 39.32° and 52.96° are assigned to (002), (101) and (102) phases of Ti, respectively [17,18,33,36,37]. High intensity of peaks reveals that L-HAP is obtained on Ti and results correlates the ATR-FTIR analysis.

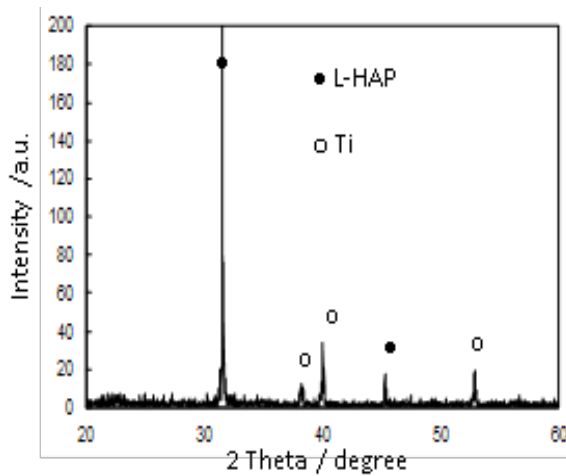


Figure 5. XRD pattern of Ti/L-HAP

The Nyquist plots of Ti and Ti/L-HAP, after 2 h immersion time in artificial saliva at 310 K, are presented in Figure 6. The semi-circular shape with a diameter of $1.2 \times 10^4 / \Omega \text{ cm}^2$ is seen for Ti which is attributed to charge transfer controlled corrosion reaction [38,39]. The maximum phase angle is 70.3° (Figure 7). The EIS result of electrode has significantly changed by L-HAP coating. In Figure 5, for Ti/L-HAP, non-closed curve is seen. In the high frequency region (at 100 Hz), the resistance is almost $126 \Omega \text{ cm}^2$ and this region is attributed to corrosion process occurring within pores of L-HAP layer. The resistant and phase angle at 0.01 Hz are almost $1.8 \times 10^4 / \Omega \text{ cm}^2$ and 75.4° (Figure 7), respectively and this region is attributed to the L-HAP film resistance. According to EIS results of these electrodes, L-HAP has protective effect against corrosion in artificial saliva at 310 K. Due to further insight, the polarization curves are presented in Figure 8.

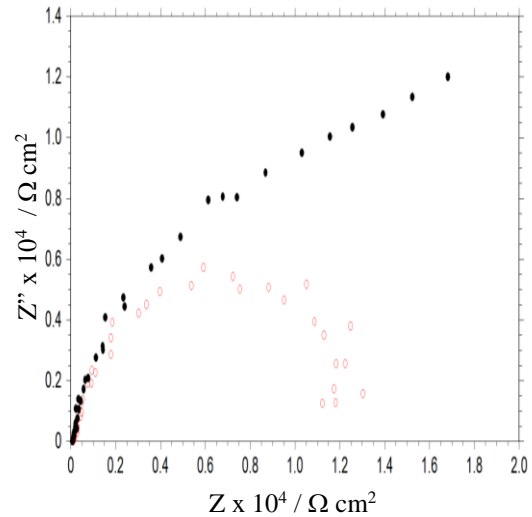


Figure 6. The Nyquist plots of Ti (o) and Ti/L-HAP (•) after 2 h immersion time in artificial saliva at 310 K

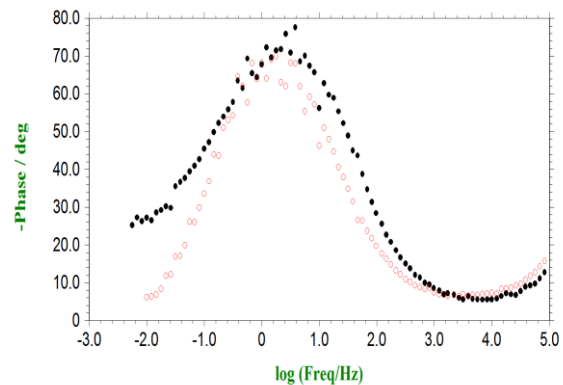


Figure 7. The log freq-phase deg. plots of Ti (o) and Ti/L-HAP (•) after 2 h immersion time in artificial saliva at 310 K

In Figure 8, the corrosion potentials (E_{corr}) of Ti and Ti/L-HAP are 1.43 and 1.64 V (vs. Ag/AgCl), respectively. The nobler (more positive) E_{corr} reflects high corrosion protection [40]. Furthermore lower cathodic and anodic current density are seen for Ti/L-HAP and it correlates with EIS measurements. As Radha said that [41], the electroless hydroxyapatite coating technique is most effective and economical way of coating metal. Consequently, results show that L-HAP protect Ti against corrosion effectively.

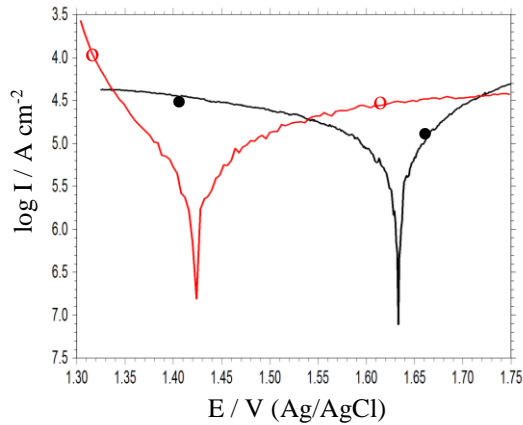


Figure 8. The polarization curves of Ti (○) and Ti/L-HAP (●) after 2 h immersion time in artificial saliva at 310 K

4. CONCLUSION

The antibiotic loaded hydroxyapatite coating (L-HAP) was produced by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method and corrosion performance was investigated *in-vitro* conditions. The ATR-FTIR, EDX and XRD results showed that, HAP coating was produced as a $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ chemical form and amoxicillin and potassium clavulanate penetrate the interior of HAP. The scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) results exhibited rough surface, which was beneficial for osteoblast adhesion, proliferation. The electrochemical measurements supported that L-HAP is a convenient coating against corrosion in artificial saliva at body temperature. Especially the E_{corr} of Ti/L-HAP was denoted a high level of corrosion resistance with the value of 1.64 V but the E_{corr} of bare sample was 1.43 V. For Ti/L-HAP, the resistance which was determined with the help of electrochemical impedance spectroscopy, at 0.01 Hz was $1.8 \times 10^4 / \Omega \text{ cm}^2$, indicated high corrosion resistance.

5. KAYNAKLAR

1. Wang F., Yang C., Duan C., Xiao D., Tang Y., Zhu J., 2015. An Organ-like Titanium Carbide Material (MXene) with Multilayer Structure

- Encapsulating Hemoglobin for a Mediator-free Biosensor. *Journal of the Electrochemical Society*, 162(1), 16-21.
2. Chen, S., Tsai, W., Chen, P., Fang, A., Say, W., 2016. Influence of Applied Voltages on Mechanical Properties and In-vitro Performances of Electroplated Hydroxyapatite Coatings on Pure Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(7), 305-308.
3. Mirzaee, M., Vaezi, M., Palizdar, Y., 2016. Synthesis and Characterization of Silver Doped Hydroxyapatite Nanocomposite Coatings and Evaluation of Their Antibacterial and Corrosion Resistance Properties in Simulated Body Fluid. *Materials Science and Engineering*, 69, 675-684.
4. Coşkun, M., Karahan, I., Golden, T., 2015. Computer Assisted Corrosion Analysis of Hydroxyapatite Coated CoCrMo Biomedical Alloys. *Surface&Coatings Technology*, 275, 1-9.
5. Wang, H., Lin, C., Hu, R., Xu, Y., 2007. Electrochemical Deposition of Nano-micro Structured Octacalcium Phosphate/protein Composite Coating on Titanium for Biomedical Applications. *ECS Transactions*, 3(19), 21-26.
6. Shiha, Y., Tsai, M., Ou, K., 2007. Effect of Oxide Film Containing Fluorine Ion on Enhancing the Initial Osseointegration of Titanium-based Alloy. *ECS Transactions*, 6(15), 21-33.
7. Matykina, E., Monfort, F., Berkani, A., Skeldon, P., Thompson, G., Gough, J., 2007. Characterization of Spark-anodized Titanium for Biomedical Applications. *Journal of the Electrochemical Society*, 154(6), 279-285.
8. Ouerd, A., Alemany-Dumont, C., Berthomé, G., Normand, B., Szunerits, S., 2007. I. Electrochemical Characterization of the Metal/Protein Interface. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(6), 593-601.
9. Kim, J., Lee, K., 2009. Dependence of the Morphology of Nanostructured Titanium Oxide on Fluoride Ion Content. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 12(3), 10-12.
10. Dunne, C., Levy, G., Hakimi, O., Aghion, E., Twomey, B., Stanton, K., 2016. Corrosion Behaviour of Biodegradable Magnesium

- Alloys with Hydroxyapatite Coatings. *Surface & Coatings Technology*, 289, 37-44.
11. Pina, V., Amigo, V., Munoz, I., 2016. Microstructural, Electrochemical and Tribo-electrochemical Characterisation of Titanium-copper Biomedical Alloys. *Corrosion Science*, 109, 115-125.
 12. Take, S., Kikuchi, K., Suda, S., Izawa, S., Itoi, Y., 2014. Preparation and Evaluation of Zn Doped HAp Plasma Spray Biocompatible Coatings on Titanium. *ECS Transactions*, 58, 17-22.
 13. Dehestani, M., Adolfsson, E., Stanciu, L., 2016. Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Powder Metallurgy Iron-hydroxyapatite Composites for Biodegradable Implant Applications. *Materials and Design*, 109, 556-569.
 14. Anjaneyulu, U., Vijayalakshmi, U., 2017. Preparation and Characterization of Novel Sol-gel Derived Hydroxyapatite/Fe₃O₄ Composites Coatings on Ti-6Al-4V for Biomedical Applications. *Materials Letters*, 189, 118-121.
 15. Akazem, F., Kiss, A., Birlik, I., Braic, V., Luculescu, C., Vladescu, A., 2014. The Corrosion and Bioactivity Behavior of SiC Doped Hydroxyapatite for Dental Applications. *Ceramics International*, 40, 15881-15887.
 16. Otsuka, Y., Kojima, D., Mutoh, Y., 2016. Prediction of Cyclic Delamination Lives of Plasma-sprayed Hydroxyapatite Coating on Ti-6Al-4V Substrates with Considering Wear and Dissolutions. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 64, 113-124.
 17. Jankovic, A., Eraković, S., Mitrić, M., Matić, I.Z., Juranić, Z.D., Tsui, G.C.P., Tang, C.Y., Mišković-Stanković, M., Rhee, K.Y., Park, S.J., 2015. Bioactive Hydroxyapatite/graphene Composite Coating and its Corrosion Stability in Simulated Body Fluid. *Journal of Alloys and Compounds*, 624, 148-157.
 18. Gopi, D., Shinyjoy, E., Sekar, M., Surendiran, M., Kavitha, L., Sampath Kumar, T., 2013. Development of Carbon Nanotubes Reinforced Hydroxyapatite Composite Coatings on Titanium by Electrodeposition Method. *Corrosion Science*, 73, 321-330.
 19. Usinskas, P., Stankeviciute, Z., Beganskiene, A., Kareiva, A., 2016. Sol-gel Derived Porous and Hydrophilic Calcium Hydroxyapatite Coating on Modified Titanium Substrate. *Surface Coatings Technology*, 307, 935-940.
 20. Palanivelu, R., Kumar, A., 2014. Scratch and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Nano Ceramics Bilayer Al₂O₃-13 wt% TiO₂/hydroxyapatite Coated on Medical Grade Titanium Substrates in SBF Environment. *Applied Surface Science*, 315, 372-379.
 21. Huang, Y., Ding, Q., Panga, X., Han, S., Yan, Y., 2013. Corrosion Behavior and Biocompatibility of Strontium and Fluorine Co-doped Electrodeposited Hydroxyapatite Coatings. *Applied Surface Science*, 282, 456-462.
 22. Asri, R.I.M., Harun, W.S.W., Hassan, M.A., Ghani, S.A.C., Buyongc, Z., 2016. A Review of Hydroxyapatite-based Coating Techniques: Sol-gel and Electrochemical Depositions on Biocompatible Metals. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 57, 95-108.
 23. Metikos-Hukovic, M., Tkalcic, E., Kwokala, I., Piljac, J., 2003. An in Vitro Study of Ti and Ti-Alloys Coated with Sol-gel Derived Hydroxyapatite Coatings. *Surface Coatings Technology*, 165, 40-50.
 24. Suchanek, K., Hajdya, M., Maximenko, A., Zarzycki, A., Marszaek, M., Jany, B.R., Krok, F., 2017. The Influence of Nanoporous Anodic Titanium Oxide Substrates on the Growth of the Crystalline Hydroxyapatite Coatings. *Materials Chemistry Physics*, 186, 167-178.
 25. Gopi, D., Shinyjoya, E., Kavithac, L., 2015. Influence of Ioni Csubstitution in Improving the Biological Property of Carbon Nanotubes Reinforced Hydroxyapatite Composite Coating on Titanium for Orthopedic Applications. *Ceram. Int.* 41, 5454-5463.
 26. Yan, Y., Zhang, X., Mao, H., Huang, Y., Ding, Q., Pang, X., 2015. Hydroxyapatite/gelatin Functionalized Graphene Oxide Composite Coatings Deposited on TiO₂ Nanotube by Electrochemical Deposition for Biomedical Applications. *Applied Surface Science*, 329, 76-82.

27. Mohan, L., Durgalakshmi, D., Geeth, M., Sankara Narayanan, T.S.N., Asokamani, R., 2012. Electrophoretic Deposition of Nanocomposite (HAp+TiO₂) on Titanium Alloy for Biomedical Applications. *Ceram. Int.*, 41(38), 3435-3443.
28. Gopi, D., Karthika, A., Rajeswari, D., Kavitha, L., Pramodd, R., Dwivedid, J., 2014. Evaluation of the Mechanical and Corrosion Protection Performance of Electrodeposited Hydroxyapatite on the High Energy Electron Beam Treated Titanium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 616, 498-504.
29. Rafieerad, A., Ashra, M.R., Mahmoodian, R., Bushroa, A.R., 2015. Surface Characterization and Corrosion Behavior of Calcium Phosphate-base Composite Layer on Titanium and its Alloys Via Plasma Electrolytic Oxidation: A Review Paper. *Material Science Engineering*, 57, 397-413.
30. Ripamonti, U., Roden, L.C., Renton, L.F., 2012. Osteoinductive Hydroxyapatite-coated Titanium Implants. *Biomaterials*, 33, 3818-3823.
31. Indira, K., Mudali, U.K., Rajendran, N., 2014. In Vitro Bioactivity and Corrosion Resistance of Zr Incorporated TiO₂ Nanotube Arrays for Orthopaedic Applications. *Applied Surface Science*, 316, 264-275.
32. Roh, H.S., Jung, S.C., Kook, M.S., Kim, B.H., 2016. In Vitro Study of 3D PLGA/n-HAp/ β -TCP Composite Scaffolds Withetched Oxygen Plasma Surface Modification in Bone Tissue Engineering. *Applied Surface Science*, 388, 321-330.
33. Kalsoom, U., Bashir, S., Ali, N., 2013. SEM, AFM, EDX and XRD Analysis of Laser Ablated Ti in Nonreactive and Reactive Ambient Environments. *Surface Coatings Technology*, 235, 297-302.
34. Romaraj, R., Taryba, M.G., Morozov, Y., 2021. On the Synergistic Corrosion Inhibition and Polymer Healing Effects of Polyolefin Coatings Modified with Ce-loaded Hydroxyapatite Particles Applied on Steel. *Electrochimica Acta*, 388, 138648-138660.
35. Srikant, T., Mishra, S.B., 2021. Post Annealing Effect on Corrosion Behavior, Bacterial Adhesion, and Bioactivity of LVOF Sprayed Hydroxyapatite Coating. *Surface&Coatings Technology*, 405, 126500-126515.
36. Jing, Z., Qianqian, C., Hu, J., 2021. Corrosion, Wear and Biocompatibility of Hydroxyapatite Bio-functionally Graded Coating on Titanium Alloy Surface Prepared by Laser Cladding. *Ceramics International*, 47, 24641-24651.
37. Siveraj, D., Kalimuthu, V., Arumugam, G., 2020. Tailoring Cu Substituted Hydroxyapatite/functionalized Multiwalled Carbon Nanotube Composite Coating on 316L SS Implant for Enhanced Corrosion Resistance, Antibacterial and Bioactive Properties. *International Journal of Pharmaceutics*, 590, 119946-119958.
38. Wen, S., Xianglei, L., Jiahui, D., Yulai, L., Ziting, L., Zimeng, Z., Guangmeng, C., 2021. Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite Coating on the Surface of Medical Magnesium Alloy and its Corrosion Resistance. *Progress in Natural Science: Materials International*, 31, 324-333.
39. Shanaghia, A., Mehrjoub, Z., Ahmadiana, A.R., Souria, P., Chub, K., 2021. Enhanced Corrosion Resistance, Antibacterial Properties, and Biocompatibility by Hierarchical Hydroxyapatite/ciprofloxacin-calcium Phosphate Coating on Nitrided NiTi Alloy. *Materials Science&Engineering*, 118, 111524- 111540.
40. Senthilkumar, G., Saravanan, K.G., Vignesh, P., Sudharshan Vishwak, R., Nivin Joy, T., Hemanandh, J., 2021. Hydroxyapatite-barium/strontium Titanate Composite Coatings for Better Mechanical, Corrosion and Biological Performance. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3618-3621.
41. Radha, R., Sreekanth, D., 2020. Electroless Tin Coated Hydroxyapatite Reinforced Mg-Sn Alloy Composite for Enhanced Bio Corrosion Resistance and Bioactivity. *Comp. Communications*, 21, 100372-100379.

Fotovoltaik Panel ve Batarya Entegre Sistemler için Yeni Bir Interleaved Tabanlı Çok Portlu İzole DA-DA Dönüştürücü Analizi

Murat Mustafa SAVRUN*¹, Alihan ATAY²

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana

²Solvaytech Mühendislik Endüstri ve Ticaret Ltd. Şti., Adana

Geliş tarihi: 02.07.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik (FV) panel ile çalışan ve batarya destekli sistemler için etkin bir kontrol yapısına sahip interleaved tabanlı çift yönlü çok portlu izole yeni bir DA-DA dönüştürücü önerilmektedir. Önerilen dönüştürücü, üretim/depolama/yük birimleri arasındaki optimum güç akışını denetlemek için tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde, FV panel ve batarya arası güç transferi interleaved DA-DA dönüştürücünün sol kol anahtarlarının kontrolü ile sağlanırken, enerji üretim/depolama birimleri ile yükler arası güç transferi ilgili devrenin sağ kol anahtarlarının kontrolü ile sağlanmaktadır. Yük tarafının izolasyonunu sağlayan yüksek frekans transformatörünün (YFT) ikincil tarafında bulunan iki yarım köprü devresi ile birbirinden bağımsız kontrol edilebilen ve farklı gerilim seviyelerine sahip iki port oluşturulmaktadır. Önerilen dönüştürücüde portlar arasındaki güç akışı kontrol döngüleri arasında yumuşak geçiş yapabilen çok döngülü bir kontrol şeması tarafından gerçekleştirilmektedir. Önerilen çok portlu dönüştürücünün uygulanabilirliğini ve etkinliğini doğrulamak için, PSIM programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen dönüştürücünün performansı farklı ışınım ve yüklenme durumları gibi dinamik koşullar altında analiz edilmiştir. Güç akış yetenekleri ve yüksek verimlilik değerleri (>%98) önerilen dönüştürücünün uygulanabilirliğini ve etkinliğini doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok portlu dönüştürücü, DA-DA dönüştürücü, Fotovoltaik panel, Batarya

Analysis of a New Interleaved-Based Multi-Port Isolated DC-DC Converter for Photovoltaic Panel and Battery Integrated Systems

Abstract

In this study, a new interleaved-based bidirectional isolated multi-port DC-DC converter with an effective control structure for photovoltaic (PV) panel powered and battery buffered systems is proposed. The proposed converter is designed to perform the optimum power flow between generation/storage/load units. In the designed system, the power transfer between the PV panel and the battery is provided by the control of the left leg switches of the interleaved DC-DC converter, while the power transfer between the energy generation/storage units and the loads is provided by the control of the right leg switches of the relevant circuit. With two half-bridge circuits on the secondary side of the high-frequency transformer (HFT), which provides load side isolation, two ports with different voltage levels and which can be controlled independently of each other are formed. In the proposed converter, the power flow between the ports is handled by a multi-loop control scheme that is able to smoothly switch between control loops. Simulation studies have been conducted in the PSIM program to verify the viability and effectiveness of the proposed multiport converter. The

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Murat Mustafa SAVRUN, msavrun@atu.edu.tr

performance of the proposed converter is analyzed under dynamic conditions such as different radiation and loading conditions. The power flow capabilities and high efficiency values (>98%) validates the viability and effectiveness of the proposed converter.

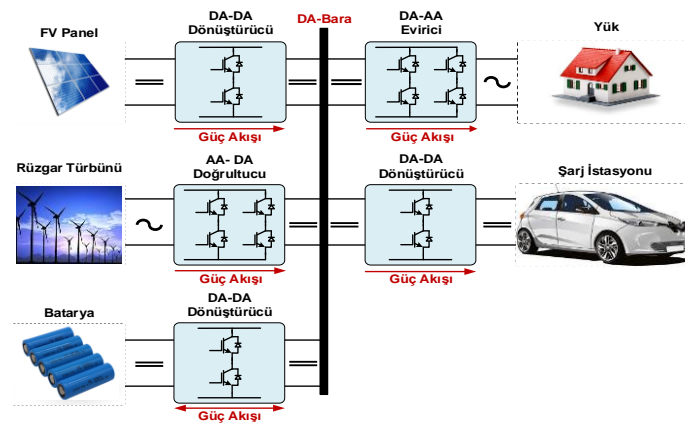
Keywords: Multi-port converter, DC-DC converter, Photovoltaic panel, Battery

1. GİRİŞ

Hızla tükenen fosil yakıtlara ve artan sera gazı emisyonlarına bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımı elektrikli araçlarda, mikro şebekelerde ve dağıtık üretimde büyük oranda artmaktadır [1]. Ancak YEK tarafından üretilen gücün kapasitesi ve kullanılabilirliği, rüzgar hızı, güneş ışınımı/sıcaklığı gibi değişken doğa koşulları gereği kararsızdır. Bu nedenle, YEK ile beslenen sistemler yüklerle kesintisiz güç sağlamak için sıklıkla enerji depolama üniteleri ile donatılırlar. YEK tarafından üretilen güç, doğrudan yüklerle veya depolama birimlerine aktarılırken, enerji depolama birimleri yenilenebilir enerji kaynaklarının anlık üretim değerlerine veya yüklerin taleplerine bağlı olarak şarj veya deşarj edilmektedir. Bu bağlamda YEK, enerji depolama birimleri ve yükler arasındaki güç aktarım arayüzü olan güç elektroniği sistemleri büyük bir öneme sahiptir. Birden fazla enerji kaynağının veya enerji depolama elemanının yer aldığı sistemlerde güç akışını sağlamak için kullanılan yapılar genel olarak çok portlu dönüştürücüler olarak adlandırılmaktadır [2]. Şekil 1’de geleneksel çok portlu dönüştürücü yapısı gösterilmektedir.

Geleneksel çok portlu dönüştürücülerde her bir bağlantı noktasının güç akışını kontrol etmek için bireysel güç elektroniği dönüştürücülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 1’de gösterildiği gibi enerji depolama birimleri için çift yönlü DA-DA dönüştürücü [3] kullanılırken FV Panel ve rüzgar türbini gibi YEK’ler için tek yönlü DA-DA dönüştürücü [4] ve AA-DA doğrultucu kullanılması gerekmektedir. Bireysel güç elektroniği dönüştürücüsü kullanımı hem sistem kompleksitesini hem de toplam maliyeti arttırmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için YEK’ler ile enerji depolama birimlerinin birbirine entegre edildiği yeni nesil çok portlu DA-DA dönüştürücüler üzerine [5-9] araştırmacılar tarafından literatürde son zamanlarda sıklıkla çalışılmaktadır.

Çok portlu dönüştürücüler kendi içerisinde tam izole ve izole olmayan sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İzole olmayan DA-DA dönüştürücüler [10-13] geleneksel azaltan, yükselten ve azaltan-yükselten topolojilerinden türetilmiş olup düşük ve orta güçlü uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. İzole olmayan topolojiler, YFT’nin olmaması nedeniyle daha basit ve kompakt bir yapı ile avantaj sağlarken, izolasyon ve esnek gerilim aralığı sağlayamamaktadır.



Şekil 1. Geleneksel çok portlu dönüştürücüler

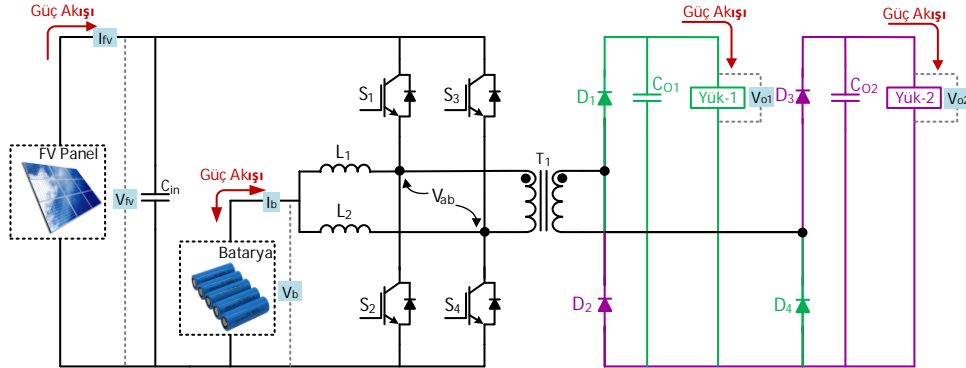
İzole çok portlu dönüştürücüler, YFT dönüş oranı ile esnek gerilim aralıkları sağlamaktadır. Bu nedenle, izole dönüştürücüler düşük çıkış gerilimine sahip YEK'ler ile donatılmış sistemler için iyi bir adaydır. Ancak, yüksek dönüş oranlı YFT'ler ile donatılmış topolojiler sınırlı gerilim kazancı sağlamalarının yanı sıra nispeten yüksek iletim kayıplarına sebep olurlar [14]. İzole topolojilerde iletim kayıplarının azaltmak için sıfır gerilim veya sıfır akım anahtarlama [15-17] teknikleri sıklıkla uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra, izole çok portlu DA-DA dönüştürücüler kendi içerisinde tamamen izole veya kısmen izole olmak üzere iki alt sınıfta incelenmektedir. Tamamen izole topolojilerde bulunan bütün bağlantı noktaları farklı bir toprak döngüsüne sahip olup galvanik izole durumdadır. Genellikle çift aktif köprü [18,19] ve tam köprü dönüştürücü [20,21] topolojilerinden türetilmiş olan tamamen izole topolojiler yüksek güçlü uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, çok yüksek güç gerektirmeyen uygulamalarda ise yarım köprü [22] topolojisinden türetilmiş çok portlu dönüştürücüler kullanılmaktadır. Yarım köprü topolojisine sahip sistemler görev döngülerinin sınırlarından dolayı esnek gerilim aralığı sağlayamamaktadır. Ayrıca, bu tip topolojiler yüksek anahtarlama elemanı sayısına sahiptir. Kısmen izole topolojilerde, oluşturulan çok portlu yapının iki ve daha fazla portu aynı toprak döngüsüne sahip olup, geriye kalan portlar ise YFT sayesinde farklı bir toprak döngüsüne sahiptir [23-25]. Kısmen izoleli topolojilerde YEK ile enerji depolama ünitesi arasındaki güç akışı kontrolü mevcut ortak anahtarlama elemanları ile sağlanarak entegre bir çift yönlü DA-DA dönüştürücü topolojisi tasarlanır [26,27]. Böylelikle, anahtarlama elemanlarının sayısı azaltılırken YFT sargılarının artmasının da önüne geçilir. Bu bağlamda, bazı çalışmalar YFT'nin birincil tarafında bağlantı noktası artışı ele alırken bazıları ise YFT'nin ikincil tarafında bağlantı noktası artışı üzerine odaklanmıştır. [28] çalışmasında, ikincil taraf tam köprü doğrultucu iki DA çıkış portu elde etmek için ortak bir toprak ve farklı pozitif terminaller ile iki ayrı anahtarlama koluna bölünmüştür. Azaltılmış anahtarlama yapısına sahip entegre dönüştürücüler içerisinde interleaved yapılar ön plana çıkmaktadır. Tek taraflı interleaved yapı ile üç port entegrasyonu

sağlanabilirken [29] çift taraflı interleaved yapılar ile dört port entegrasyonu yapılabilmektedir [30]. Tek taraflı interleaved yapıların ikincil tarafı için aday birçok köprü, köprüsüz, rezonant doğrultucu yapıları bulunmaktadır [29,31]. Bu topolojilerde her ne kadar ek anahtarlama elemanları ile yüksek kazanç hedeflense de bağımsız yük bağlantısı ve yüklerin bireysel kontrolü sağlanmamaktadır.

Yapılan literatür taraması, çok portlu dönüştürücülerin anahtarlama elemanlarının fazlalığını, yüksek kontrol kompleksitesini ve yüksek işlem yükünü ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, azaltılmış anahtarlama elemanı, düşük maliyet ve yüksek verim avantajları ile interleaved tabanlı çift yönlü çalışabilen çok portlu izole yeni bir DA-DA dönüştürücü sunulmaktadır. Önerilen topolojinin sunduğu yenilikler; (i) nispeten düşük gerilimli batarya sisteme kolaylıkla entegre edilmekte, (ii) çeşitli enerji üretim/depolama birimleri için çoklu giriş bağlantı noktaları ve birbirinden bağımsız kontrol edilebilen çift çıkış bağlantı noktası sağlanmakta, (iii) düşük anahtarlama elemanı sayısı ile düşük maliyetli bir güç elektroniği çözümü elde edilmekte ve (iv) enerji birimleri ve yükler arasındaki güç transferini yönetmek için kontrol döngüleri arasında anlık geçişe izin veren çok döngülü bir kontrol yapısı gerçekleştirilmektedir. Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de, önerilen çok portlu dönüştürücü topolojisini tanıtmakta ve çalışma prensibini açıklamaktadır. Bölüm 3'te, önerilen dönüştürücünün çok döngülü kontrol yapısı sunulmaktadır. Performans analizi sonuçları Bölüm 4'te sunulmaktadır. Bölüm 5, ilgili tartışma ile birlikte sonuçları ortaya koymaktadır.

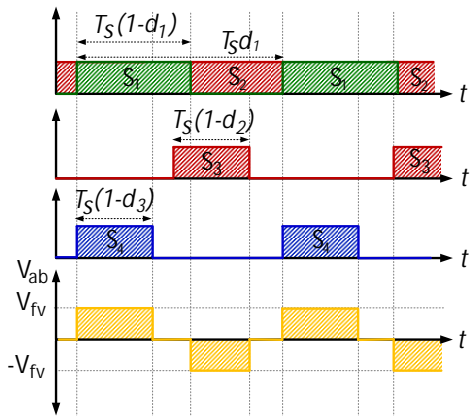
2. ÖNERİLEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Önerilen çok portlu DA-DA dönüştürücünün güç devresi Şekil 2'de gösterilmekte olup interleaved alçaltan-yükselten dönüştürücü, YFT ve yarım köprü doğrultuculardan oluşmaktadır. Önerilen dönüştürücü FV panelden batarya ve yükler ve FV panel ve bataryadan yükler optimum güç akışını sağlamak ve aynı zamanda yük gerilimlerini istenilen seviyede sabit tutmak için tasarlanmıştır.



Şekil 2. Önerilen çok portlu dc-dc dönüştürücü

Interleaved DA-DA dönüştürücü nispeten düşük gerilimli bataryanın entegre edilmesini sağlamanın yanı sıra FV panel ile batarya arasında çift yönlü güç transferine de olanak sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen dönüştürücü YFT dönüş oranı ile yüksek gerilim kazancı sağlamayı da mümkün kılmaktadır. YFT'nin ikincil tarafı yarım köprü doğrultucu devreleri ile donatılmıştır.



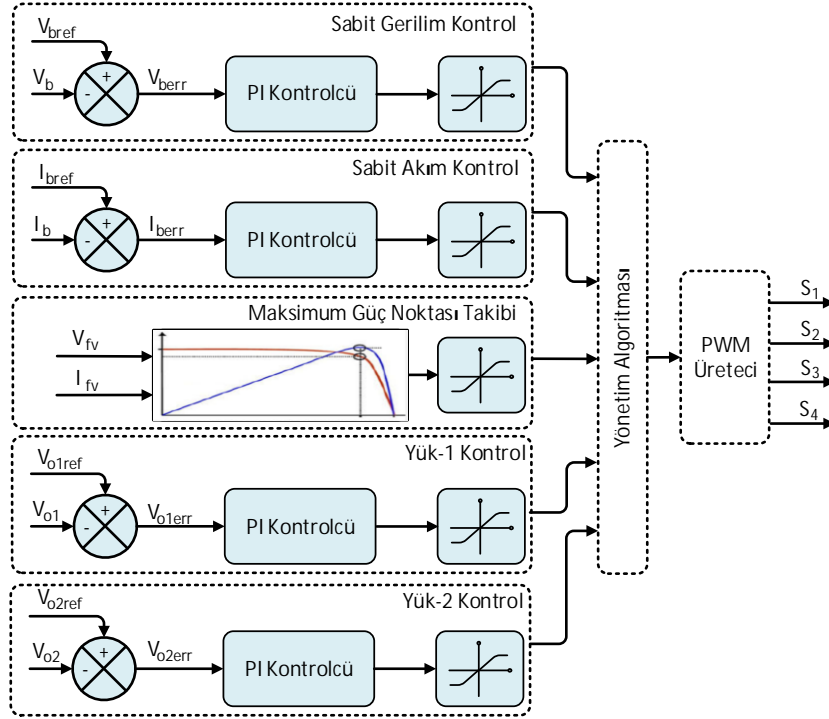
Şekil 3. Önerilen dönüştürücünün kontrol yöntemi

Önerilen dönüştürücünün anahtarlama durumları Şekil 3'te verilmiştir. Birincil tarafta bulunan dört anahtarlama elemanı farklı kontrol döngüleri tarafından tetiklenmektedir. S₁ ve S₂ anahtarları maksimum güç noktası izleme (MPPT), sabit akım (SA) ve sabit gerilim (SG) kontrol döngüleri tarafından tetiklenirken, S₃ ve S₄ anahtarları yüklerin gerilim regülasyonlarını sağlamak için yük kontrol döngüleri tarafından tetiklenmektedir. S₁ ve S₂ anahtarlama elemanlarının açma/kapama

sinyalleri birbirini tamamlayan şekilde çalışmaktadır. T_s bir anahtarlama periyodunu temsil etmektedir. d₁ olarak adlandırılan görev döngüsü değeri MPPT, SA ve SG kontrol döngülerinin PI çıkışlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. S₃ ve S₄ anahtarlama elemanlarının görev döngüsü değerleri (d₂ ve d₃) ise maksimum %50 değerine ulaşabilmektedir. Bunun nedeni S₃ ve S₄ anahtarlarının birbirleri arasında 180° derece faz farkı ile tetiklenmesidir. Bu noktada, ilgili anahtarların %50 görev döngüsünü aşmaları halinde alt ve üst anahtarlar aynı anda açılacak ve kısa devre olacaktır. S₃ ve S₄ anahtarlarının görev döngüsü değerleri yük kontrol döngülerine bağlı olarak belirlenmektedir.

3. KONTROL YAPISI

Önerilen çok portlu DA-DA dönüştürücü sisteminin kontrolcüsü Şekil 4'te gösterildiği üzere MPPT, SA, SG ve yük kontrol döngüleri olmak üzere çoklu kontrol döngülerinden oluşmaktadır. Önerilen kontrolcü yapısı FV panel/batarya/yükler arasında optimum güç akışını sağlayabilmek için Şekil 5'te verilen yönetim algoritması koordinasyonunda FV panel gücünü, yüklerin talebini ve bataryanın durumunu göz önüne bulundurarak en uygun kontrol döngüsünü seçmektedir. Kontrolcünün temel öncelikleri şunlardır; (i) yüklere kesintisiz güç sağlamak ve gerilimlerinin sürekliliğini sağlamak, (ii) bataryanın servis ömrünü uzatmak için SA/SG şarj algoritmalarını uygulamak, (iii) FV panelin maksimum güç üretiminin sağlamak.



Şekil 4. Önerilen topolojinin etkin kontrolcüsü

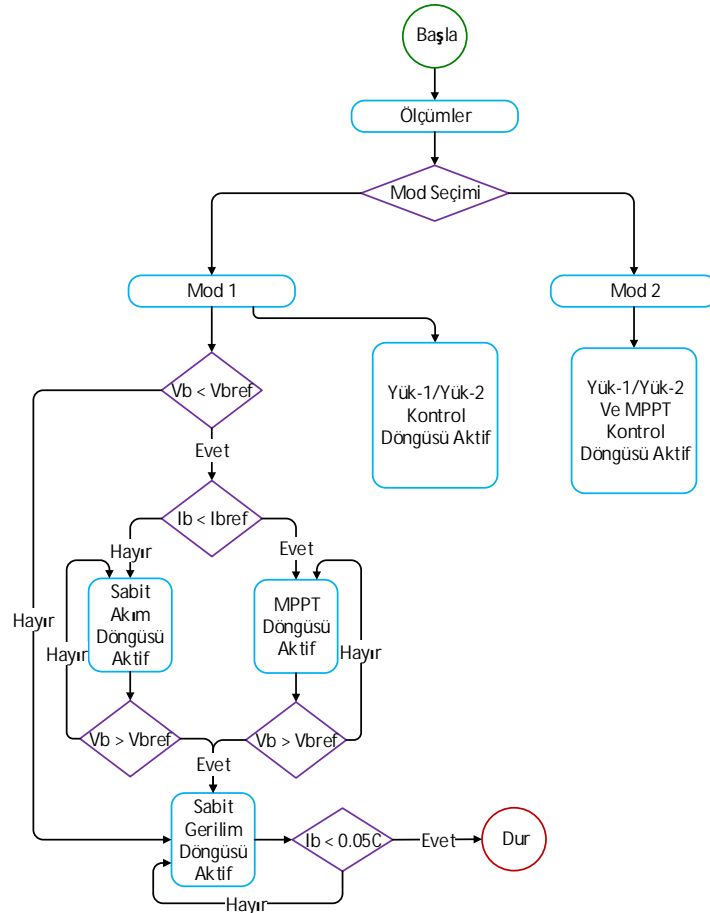
Önerilen topoloji FV panelin ve yüklerin anlık durumlarına göre iki farklı çalışma moduna sahiptir. Mod 1, yüklerin talep ettiği güçten daha düşük bir anlık FV panel gücüne karşılık gelmektedir. Bu durum yükler tarafından yüksek güç talebi ya da düşük ışıyım durumlarında ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma modunda, yük gerilimlerini sabit tutmak ve yüklere kesintisiz güç sağlamak için FV panel batarya tarafından tamponlanmaktadır. Böylelikle, yükler hem FV panel hem de batarya tarafından beslenmektedir. Mod 2 ise yüklerin talep ettiği güçten daha yüksek bir anlık FV panel gücüne karşılık gelmektedir. Bu çalışma modunda, FV panelin artı kalan gücü bataryayı şarj eder. Böylelikle FV panel, yüklere kesintisiz güç sağlarken bataryayı da şarj etmektedir.

Güç akışı kontrolü ilgili kontrolcüler tarafından sağlanırken kontrol döngüleri arasındaki geçiş yönetim algoritması tarafından ayarlanmaktadır. Yük kontrol döngüleri sürekli olarak aktif olmasına rağmen MPPT, SA ve SG kontrol

döngüleri arasında geçiş gerçekleştirilmektedir. MPPT, SA ve SG kontrol döngüleri aynı anahtarlama elemanını kontrol ettikleri için eş zamanlı çalışmamaktadırlar. Yük kontrol döngüsünün amacı, S_3 ve S_4 anahtarlama elemanlarını kullanarak yük gerilimlerinin regülasyonunu sağlamaktır. S_3 ve S_4 tetikleme sinyallerinin arasında 180° derece faz kayması olup minimum %5, maksimum %50 görev döngüsü değerlerini alabilmektedirler. Görev döngüsü değeri yüklerin güç talebine göre PI kontrol yöntemi ile belirlenmektedir. Bu noktada, S_3 anahtarının görev döngüsü değeri Yük-1'in gerilim regülasyonunu sağlarken, S_4 anahtarının görev döngüsü değeri Yük-2'nin gerilim regülasyonunu sağlamaktadır. MPPT kontrol döngüsünün amacı, FV panelinden maksimum gücü çıkarmaktır. Maksimum güç çıkarma işlemi, literatürde ve uygulamalarda düşük işlem yükü ve kullanım kolaylığı avantajlarından dolayı sıklıkla kullanılan Değiştir&Gözlemlen (P&O) metodu ile gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü, FV panelin çıkış gerilimini (V_{fv}) /akımını (I_{fv}) izlemekte ve anlık

mevcut gücünü hesaplamaktadır. Ayrıca, kontrolcü hesaplanan güç değişimini dikkate alarak FV panel çıkış gerilimini belirli bir yönde değiştirerek güç değişimini gözlemlemektedir. Böylelikle, MPPT kontrol döngüsü hesaplanan güce bağlı olarak görev döngüsü değerini dinamik olarak hesaplamakta ve S_1 ve S_2 anahtarlarını tetiklemektedir. SA kontrol döngüsünün amacı, anlık FV panel gücünün yüklerin toplam gücünden büyük olduğu zamanlarda bataryanın sabit akım ile şarj edilmesini sağlamaktır. Sabit akım değeri veya diğer bir deyişle maksimum şarj akımı batarya nominal kapasitesinin yarısına denk gelmektedir. Sistemde kullanılmakta olan batarya nominal kapasitesi 100 Ah olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, batarya maksimum 50 A ile şarj edilebilmektedir. SA kontrol döngüsü, ölçülen

batarya şarj akımı (I_b) ile referans (I_{bref}) 50 A değerlerini karşılaştırıp çıkan hata değerini (I_{berr}) PI kontrolcüye uygulayarak S_1 ve S_2 anahtarlarının görev döngüsü değerlerini belirlemektedir. SA kontrol döngüsünü SG kontrol döngüsü takip eder. SA kontrolünün devamı olarak nitelendirilebilen bu kontrol döngüsü bataryanın belirlenen maksimum gerilim değerine ulaşmasından sonra aktifleşmektedir. SG kontrolü esnasında batarya paketlerinin şarj akımı üstel olarak düşer ve şarj akımı batarya nominal kapasitesinin %0,5'ine ulaşınca şarj işlemi sona erer. SG kontrol döngüsü, ölçülen batarya gerilimi (V_b) ile referans (V_{bref}) 82,5 V değerlerini karşılaştırıp çıkan hata değerini (V_{berr}) PI kontrolcüye uygulayarak S_1 ve S_2 anahtarlarının görev döngüsü değerlerini belirlemektedir.



Şekil 5. Yönetim algoritması

4. PERFORMANS ANALİZİ

Önerilen interleaved DA-DA dönüştürücü tabanlı izole edilmiş çok bağlantı noktalı DA-DA dönüştürücünün ve kontrolcünün benzetim çalışmaları ve performans incelemeleri PSIM ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında, 1Soltech firmasına ait 1sth-215-p 7 paralel 7 seri FV panel kullanılarak 10 kW güç elde edilmiştir. Ayrıca, 72 V 100 A batarya

kullanılarak FV panel desteklenmiştir. Yükler 60 V ve 40 V gerilim seviyelerine sahip olup güç tüketimleri benzetim çalışmalarında her birisi için azami 2 kW olarak belirlenmiştir. Benzetim modelinin parametreleri Çizelge 1’de verilmektedir. Önerilen sistemin bütün modlarının ve kontrol döngülerinin performans testleri iki durum çalışması altında gerçekleştirilmiştir. Bu durum çalışmaları Çizelge 2’de özetlenmektedir.

Çizelge 1. Sistem parametreleri

Sistem	Parametre	Değer
FV panel	FV maksimum gücü (1000 W/m ²)	10500 W
	Maksimum güç noktası gerilimi (1000 W/m ²)	207 V
	Maksimum güç noktası akımı (1000 W/m ²)	50 A
Batarya	Batarya kapasitesi	100 Ah
	Batarya nominal gerilimi	72 V
	Batarya maksimum şarj gerilimi	82.5 V
	Batarya maksimum şarj akımı	50 A
Interleaved dönüştürücü	Endüktör (I _{L1})	20 uH
	Endüktör (I _{L2})	20 uH
Genel	Nominal yük 1 gerilimi	60 V
	Yük 1 çıkış kapasitesi	1 mF
	Nominal yük 2 gerilimi	40 V
	Yük 2 çıkış kapasitesi	1 mF
	Anahtarlama frekansı	20 kHz
	YFT mıknatıslanma endüktansı	1 mH
	YFT birincil kaçak endüktansı	4 uH
	YFT ikincil kaçak endüktansı	4 uH
YFT dönüşüm oranı	1:1	

Çizelge 2. Durum çalışmaları

Zaman (s)	Durum çalışması 1				Durum çalışması 2		
	0-0,02	0,02-0,04	0,04-0,063	0,063-0,08	0- 0,02	0,02-0,04	0,04-0,06
Işınım (W/m ²)	300	600	1000	1000	350	350	350
Sıcaklık (°C)	25	25	25	25	25	25	25
Yük-1 güç (W)	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000
Yük-2 güç (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1500
Batarya şarj/Deşarj	Deşarj	Şarj	Sabit akım şarj	Sabit gerilim şarj	Deşarj	Şarj	Şarj
Mod	Mod 1	Mod 2	Mod 2	Mod 2	Mod 1	Mod 2	Mod 2

Birinci durum çalışmasında, hem FV panelden batarya ve yükler hem de FV panel ve bataryadan yükler güç transferi durumları incelenmiştir. Bunların yanı sıra, batarya şarj durumu esnasında MPPT ve batarya şarj algoritmalarının performansları da değerlendirilmiştir. Birinci durum çalışmasında bahsi geçen güç transfer durumları ve kontrol döngülerinin yanı sıra bu modlar ve döngüler arasındaki geçişler de incelenmiştir. 0-0,02 sn'lik kararlı hal zaman aralığı, 300 W/m² ışınım değeri, 25 °C sıcaklık ve 4 kW'lık toplam yük talebi ile mod 1'i temsil etmektedir. Bu zaman aralığında FV panel anlık güç üretim değeri yüklerin talep ettiği toplam güç değerinden düşüktür. Bu nedenle, yükler kesintisiz güç sağlanması için batarya deşarj olmaktadır. İlgili zaman aralığında MPPT ve yük kontrol döngüleri aktiftir.

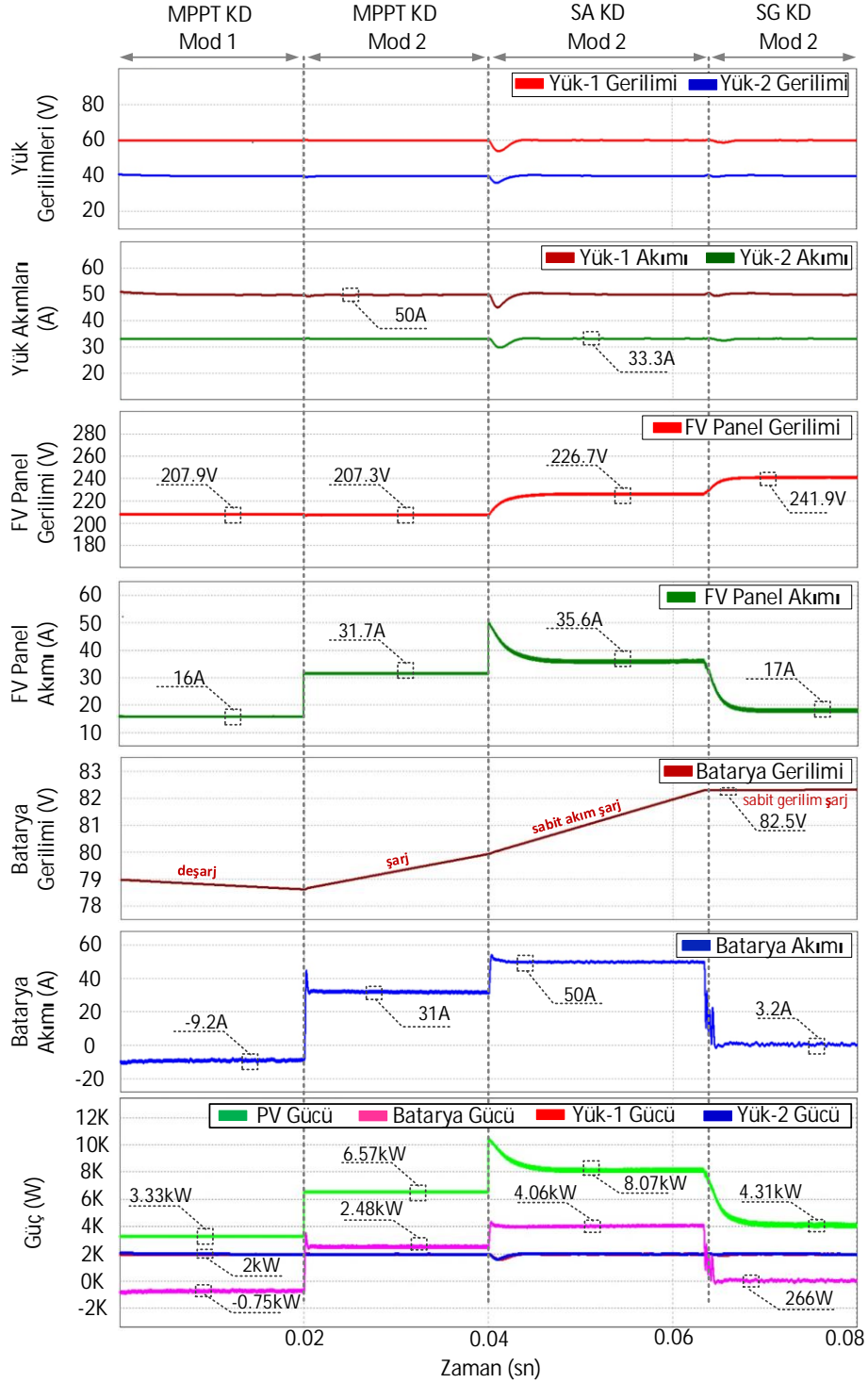
Birinci durum çalışmasının 0,02 sn'sinde PV'nin ışınım değeri 300 W/m² değerinden 600 W/m² değerine çıkartılarak sistemin geçici hal durumundaki dinamik tepkisi gözlemlenmiştir. 0,02-0,04 sn'lik kararlı hal zaman aralığı, 600 W/m² ışınım değeri, 25 °C ve 4 kW'lık toplam yük talebi ile mod 2'yi temsil etmektedir. Bu zaman aralığında FV panelin anlık güç üretim değeri yüklerin talep ettiği toplam güç değerinden büyüktür. FV panelin arta kalan gücü bataryayı şarj etmektedir. Batarya şarj akımı belirlenen maksimum şarj akımından az olduğu için ilgili çalışma aralığında MPPT ve yük kontrol döngüleri aktiftir.

Birinci durum çalışmasının 0,04 sn'sinde PV'nin ışınım değeri 600 W/m² değerinden 1000 W/m² değerine artırılmış ve FV panelin gücü, üretebileceği maksimum değere ulaşmıştır. 0,04-0,063 sn'lik kararlı hal zaman aralığı, 1000 W/m² ışınım değeri, 25 °C ve 4 kW'lık toplam yük talebi ile mod 2'yi temsil etmektedir. FV panelin anlık güç üretiminin artışına paralel olarak batarya şarj akımı da artmış ve maksimum şarj akımı limitine ulaşmıştır. Bu nedenle, ilgili zaman aralığında MPPT kontrol döngüsü yerine SA kontrol döngüsü aktifleşerek S₁ ve S₂

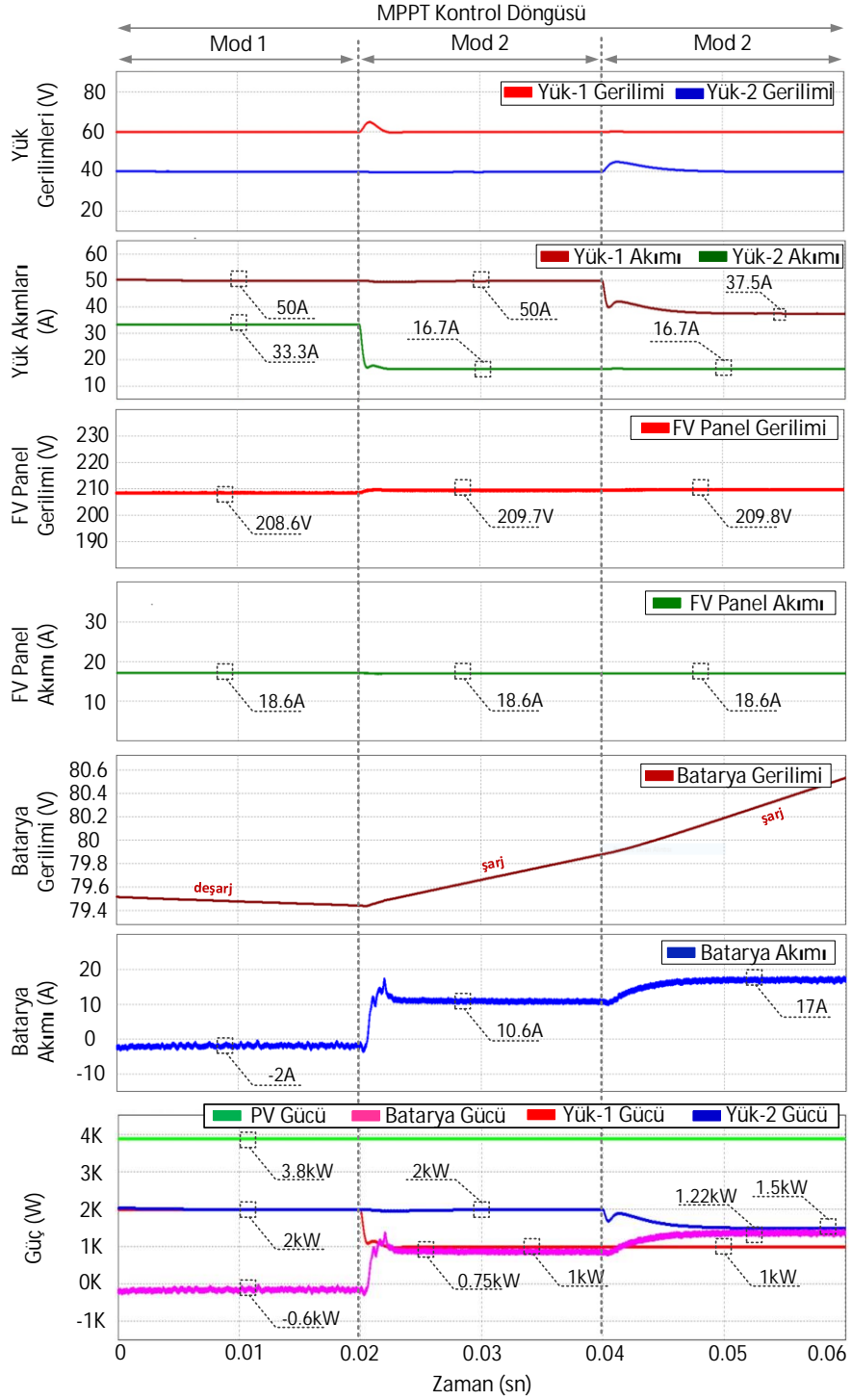
anahtarlarını tetiklemeye başlamıştır. Yük gerilimleri yük kontrol döngüleri tarafından regüle edilmeye devam etmektedir. Batarya geriliminin birinci durum çalışmasının 0,063 sn'sinde belirlenen referans gerilime ulaşmasını takiben aktif kontrol döngüsü değişerek SG kontrol döngüsü devreye girmiştir. 0,063-0,08 sn zaman aralığındaki güç akışı mod 2'yi temsil ederken ilgili zaman aralığında SG ve yük kontrol döngüleri aktiftir.

İkinci durum çalışmasında, önerilen topolojinin performansı FV panel ışınım ve sıcaklık değerleri sabit iken anlık yük değişimlerinde incelenmiştir. Şekil 7 ikinci durum çalışması performans dalga formlarını göstermektedir. İkinci durum çalışmasının 0-0,02 sn kararlı hal zaman aralığı, 350 W/m² ışınım değeri, 25 °C ve 2+2 kW yük talepleri ile mod 1'i temsil etmektedir. İlgili zaman aralığında FV panel yükleri beslerken batarya desteklemekte ve deşarj olmaktadır. İkinci durum çalışmasının 0,02 sn'sinde yük 1 ve yük 2'nin güç talepleri sırasıyla 1 kW ve 2 kW olarak değişmiştir. İlgili zamanda yüklerin FV panelden talep ettikleri güç anlık FV panel üretiminden az olduğu için batarya şarj olmaya başlamıştır. Bu nedenle, 0,02-0,04 sn zaman aralığı mod 2'yi temsil etmektedir. İkinci durum çalışmasının 0,04 sn'sinde yük 1 ve yük 2'nin güç talepleri sırasıyla 1 kW ve 1,5 kW olarak değişmiştir. İlgili zaman aralığında FV panel hem yükleri beslemekte hem de bataryayı şarj etmektedir.

Performans dalga formları güç akış varyasyonlarının yanı sıra önerilen dönüştürücü verimliliği hakkında da bilgi vermektedir. Belirlenen çalışma modları dikkate alındığında mod 1'in verimlilik değeri %98 olarak hesaplanırken, mod 2'nin verimlilik değeri sistemin aktif kontrol döngüsüne göre değişkenlik göstermektedir. Sistem mod 2 çalışma durumunda MPPT, SA ve SG kontrol döngüleri aktif iken verimlilik değerleri sırasıyla %98, %98,5 ve %98,5 olarak hesaplanmaktadır. Önerilen dönüştürücünün verimlilik değerleri, olası tüm güç akışı koşullarında etkinliğini göstermektedir.



Şekil 6. Durum çalışması 1 performans analizi



Şekil 7. Durum çalışması 2 performans analizi

5. SONUÇ

Bu çalışma FV panel ile çalışan ve batarya ile destekli sistemler için etkin bir kontrol şemasına sahip interleaved tabanlı çift yönlü çalışabilen çok portlu izole yeni bir DA-DA dönüştürücü önermektedir. Önerilen dönüştürücünün başlıca avantajları şunlardır; (i) çeşitli enerji üretim/depolama birimleri için çoklu giriş bağlantı noktaları ve birbirinden bağımsız kontrol edilebilen çift çıkış bağlantı noktası, (ii) ek dönüştürücüye veya fazladan anahtarlama elemanına ihtiyaç duymadan nispeten düşük gerilimli batarya entegrasyonu, (iii) düşük anahtarlama elemanı sayısı ile düşük maliyetli bir dönüştürücü, (iv) kontrol döngüleri arasında anlık geçişe izin veren çok döngülü bir kontrol yapısı. Önerilen çok portlu dönüştürücünün etkinliği, çeşitli çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen çoklu bağlantı noktasına sahip dönüştürücünün tüm güç akış varyasyonlarını yüksek verimlilikle (>%98) gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Önerilen sistem kararlı hal koşullarında yüksek performans göstermekte ve bunun yanı sıra, geçici hal koşullar sırasında kontrol döngüleri arasında yumuşak geçişler ile etkin güç aktarımı sağlamaktadır.

6. KAYNAKLAR

1. Savrun, M.M., 2021. Z-source Converter Integrated dc Electric Spring for Power Quality Improvement in dc Microgrid. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, in press, doi: 10.1016/j.jestch.2021.05.004.
2. Savrun, M.M., Atay, A., 2021. High Voltage Gain Multi-port Bidirectional DC-DC Converter with an Effective Multi-loop Control Strategy for PV/Battery Integrated Systems. *European Mechanical Science*, 5(3), 99-104.
3. Singh, R.K., Mishra, S., 2013. A Magnetically Coupled Feedback-clamped Optimal Bidirectional Battery Charger. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(2), 422-432.
4. Das, M., Agarwal, V., 2016. Design and Analysis of a High-efficiency DC-DC Converter with Soft Switching Capability for Renewable Energy Applications Requiring High Voltage Gain. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63(5), 2936-2944.
5. Alhatlani, A., Batarseh, I., 2019. Review of Partially Isolated Three-port Converters for PV-Battery Systems That Interface a PV, Bidirectional Battery, and Load. *IEEE Conf. Power Electron. Renew. Energy, CPERE 2019*, 465-472.
6. Bhattacharjee, A.K., Kutkut, N., Batarseh, I., 2018. Review of Multiport Converters for Solar and Energy Storage Integration. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34(2), 1431-1445.
7. Moradisizkoochi, H., Elsayad, N., Mohammed, O.A., 2019. A Family of Three-port Three-level Converter Based on Asymmetrical Bidirectional Half-bridge Topology for Fuel Cell Electric Vehicle Applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34(12), 11706-11724.
8. Zhang, N., Sutanto, D., Muttaqi, K.M., 2016. A Review of Topologies of Three-port DC-DC Converters for the Integration of Renewable Energy and Energy Storage System. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 56, 388-401.
9. Jyotheeswara Reddy, K., Natarajan, S., 2018. Energy Sources and Multi-input DC-DC Converters Used in Hybrid Electric Vehicle Applications-A Review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43(36), 17387-17408.
10. Sato, Y., Uno, M., Nagata, H., 2020. Nonisolated Multiport Converters Based on Integration of PWM Converter and Phase-shift-switched Capacitor Converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 35(1), 455-470.
11. Ganjavi, A., Ghoreishy H., Ahmad, A.A., 2018. A Novel Single-input Dual-output Three-level. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10), 8101-8111.
12. Faraji, R., 2018. Soft-switched Nonisolated High Step-up Three-port. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33(12), 10101-10111.
13. Gan, C., Jin, N., Sun, Q., Kong, W., Hu, Y., Tolbert, L.M., 2018. Multiport Bidirectional SRM Drives for Solar-assisted Hybrid Electric Bus Powertrain with Flexible Driving and Self-charging Functions. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33(10), 8231-8245.
14. Xue, F., Yu, R., Huang, A.Q., 2017. A 98.3% Efficient GaN Isolated Bidirectional DC-DC

- Converter for DC Microgrid Energy Storage System Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 9094-9103.
15. Ding, Z., Yang, C., Zhang, Z., Wang, C., Xie, S., 2014. A Novel Soft-switching Multiport Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Energy Storage System. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29(4), 1595-1609.
 16. Liu, D., Li, H., 2006. A ZVS Bi-directional DC-DC Converter for Multiple Energy Storage Elements. *IEEE Trans. Power Electron*, 21(5), 1513-1517.
 17. Sathyan, S., Suryawanshi, H.M., Shitole, A.B., Ballal, M.S., Borghate, V.B., 2018. Soft-switched Interleaved DC/DC Converter as Front-end of Multi-inverter Structure for Micro Grid Applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33(9), 7645-7655.
 18. Falcones, S., Ayyanar, R., Mao, X., 2013. A DC-DC Multiport-converter-based Solid-state. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2192-2203.
 19. Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J.L., Hendrix, M.A.M., 2008. Transformer-coupled Multiport ZVS Bidirectional DC-DC Converter with Wide Input Range. *IEEE Trans. Power Electron.*, 23(2), 771-781.
 20. Karthikeyan, V., Gupta, R., 2018. Multiple-input Configuration of Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Power Flow Control in Combinational Battery Storage. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 14(1), 2-11.
 21. Zhang, Z., Thomsen, O.C., Andersen, M.A.E., Nielsen, H.R., 2012. Dual-input Isolated Full-bridge Boost DC-DC Converter Based on the Distributed Transformers. *IET Power Electron.*, 5(7), 1074-1083.
 22. Tao, H., Duarte, J.L., Hendrix, M.A.M., 2008. Three-port Triple-half-bridge Bidirectional Converter with Zero-voltage Switching. *IEEE Trans. Power Electron.*, 23(2), 782-792.
 23. Dusmez, S., Li, X., Akin, B., 2016. A New Multiinput Three-level DC/DC Converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 31(2), 1230-1240.
 24. Zeng, J., Qiao, W., Qu, L., 2015. An Isolated Three-port Bidirectional DC-DC Converter for Photovoltaic Systems with Energy Storage. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 51(4), 3493-3503.
 25. Jianwu, Z., Wei, Q., Liyan, Q., Jiao, Y., 2014. An Isolated Multiport DC-DC Converter for Simultaneous Power Management of Multiple Different Renewable Energy Sources. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 2(1), 70-78.
 26. Savrun, M.M., Atay, A., 2020. Multiport Bidirectional DC-DC Converter for PV Powered Electric Vehicle Equipped with Battery and Supercapacitor. *IET Power Electron.*, 13(17), 3931-3939.
 27. Hong, J., Yin, J., Liu, Y., Peng, J., Jiang, H., 2019. Energy Management and Control Strategy of Photovoltaic/Battery Hybrid Distributed Power Generation Systems with an Integrated Three-Port Power Converter. *IEEE Access*, 7, 82838-82847.
 28. Wu, H., Jia, Y., Yang, F., Zhu, L., Xing, Y., 2020. Two-stage Isolated Bidirectional DC-AC Converters with Three-port Converters and Two DC Buses. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(4), 4428-4439.
 29. Wu, H., Zhang, J., Qin, X., Mu, T., Xing, Y., 2016. Secondary-side-regulated Soft-Switching Full-Bridge Three-port Converter Based on Bridgeless Boost Rectifier and Bidirectional Converter for Multiple Energy Interface. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31, 4847-4860.
 30. Ding, Z., Yang, C., Zhang, Z., Wang, C., Xie, S., 2014. A Novel Soft-switching Multiport Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29, 1595-1609.
 31. Wu, F., Wang, K., Luo, S., 2021. Hybrid-three-level Current-fed series-resonant Isolated DC-DC Converter and its Optimization Modulation Strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, in press doi: 10.1109/TPEL.2021.3098452.

Yapısal Olarak Değiştirilmiş HMX-DFT Çalışması

Mehmet Erman MERT*¹

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Adana

Geliş tarihi: 05.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Oktahidro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazosin (HMX) askeri ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan nitramin türevi bir patlayıcıdır. HMX ve benzeri özelliklere sahip patlayıcılar için duyarlılık önemli bir parametredir. Duyarlılığın düşürülmesi sayesinde ısı, sıcaklık, çarpma, sürtünme ile statik elektrik deşarjı gibi çeşitli olayların oluşmasıyla meydana gelebilecek kontrolsüz patlamalar önlenebilir. Bu amaçla, çeşitli katkı maddeleri kullanmak veya patlayıcı etkide önemli bir kayıba neden olmaksızın kimyasal modifikasyonlar yapılmaktadır. HMX(C₄H₈N₈O₈) molekülünün 4 tane nitro grubu vardır. Bu çalışmada, nitro gruplarının nitrozo ve amino gruplarına dönüştürülmesiyle duyarlılığı düşürmenin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Balistik özellikler, yani patlama hızı (D) ve patlama basıncı (P) Kamlet-Jacobs denklemleri kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, belirtilen moleküler modifikasyonlarla, HMX'in duyarlılığının düşürülebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HMX (Oktojen), Patlama basıncı, Patlama hızı, Yoğunluk fonksiyonu teorisi

Structurally Modified HMX-A DFT Study

Abstract

Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazosine (HMX) is a nitramine explosive derivative that widely used in military and industrial applications. The sensitivity is a significant parameter for HMX and explosives which have similar properties. By reducing the sensitivity, uncontrolled explosions that may occur due to various events such as heat, temperature, impact, friction and static electricity discharge can be prevented. For this purpose, chemical modifications are made without using various additives or causing a significant loss in explosive effect. HMX (C₄H₈N₈O₈) molecule has 4 nitro groups. In this study, it is thought that it may be possible to reduce the sensitivity by converting these nitro groups into nitroso and amino groups. Ballistic properties, ie detonation velocity (D) and detonation pressure (P), are investigated using Kamlet-Jacobs equations. According to the results, it was determined that the sensitivity of HMX can be decreased with the specified molecular modifications.

Keywords: HMX (Octogen), Detonation pressure, Detonation velocity, Density function theory

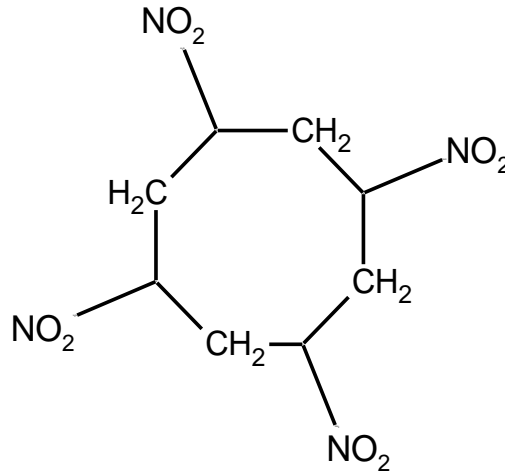
*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet Erman MERT, memert@atu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji malzemeler üzerine yapılan teorik çalışmalar moleküler modellemenin gelişimi ile günden güne hız kazanmıştır. Geliştirilen moleküler modelleme programları sayesinde moleküllerin geometrileri, enerjileri, hal değişimleri, kimyasal etkinlikleri, IR, UV ve NMR spektrumları, bir enzim ile bir yüzeyin etkileşimi ve maddelerin fiziksel özellikleri gibi bir takım özellikler hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Bu sayede yapılacak olası deneysel çalışmalar hakkında önceden bilgi sahibi olunabilmekte ve mevcut çalışmalar ise geliştirilebilmektedir [1-3].

Oktahidro -1,3,5,7- tetranitro -1,3,5,7- tetrazosin (HMX), patlayıcı bir polinitramindir [4]. Kimyasal formülü C₄H₈N₈O₈ olan ve yaklaşık 286°C erime

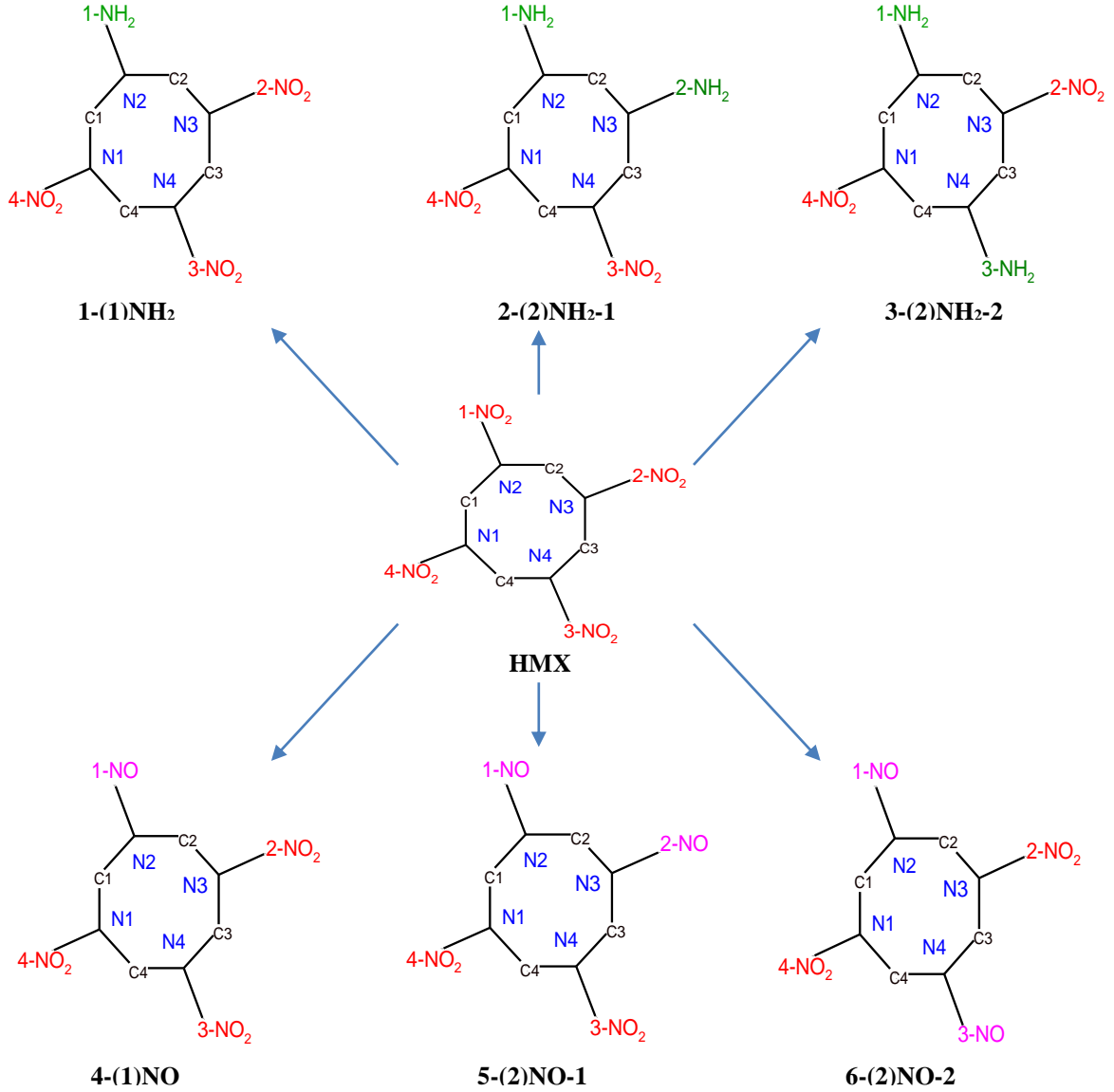
noktasına sahip renksiz bir katıdır [5]. HMX, heksaminin asetik asit/asetik anhidrit çözücüsü içinde amonyum nitrat ve nitrik asit ile nitratlanmasıyla sentezlenir [6]. Yapı olarak HMX'e benzer bir başka patlayıcı olan siklotrimetilen-trinitramin (RDX) sentezi sırasında da az miktarda HMX oluşur. Termal kararlılığı ve sahip olduğu yüksek balistik özellikleri nedeniyle diğer patlayıcılara göre askeri ve endüstriyel uygulamalar için önemli bir malzeme haline gelmiştir [7,8]. HMX, yüksek sıcaklıklarda (279°C ve üzeri) şiddetli bir şekilde patlar [5]. Bu özellik nedeniyle, nükleer cihazlarda parçalanabilir malzemeyi patlatmak için, plastik bağlı patlayıcıların bir bileşeni olarak, roket itici yakıtının bir bileşeni olarak sıklıkla kullanılmaktadır [9].



Şekil 1. HMX molekülü

Patlayıcı hassasiyetinin azaltılması ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [10-15]. Bu kapsamda gerçekleştirilen yöntemlerden ilki katkı maddelerinin ve patlayıcı kaplamalarının kullanılmasıdır. İkinci yöntem ise bu çalışmada da sunulduğu gibi, patlayıcı molekülün yapısında balistik özelliklerini fazla değiştirmeden moleküler düzeyde değişiklikler yapmaktır. Şekil 1'den görüleceği üzere HMX molekülü 4 tane nitro grubu içermektedir. Bu nitro (-NO₂) gruplarının nitrozo (-NO) ve amino (-NH₂) gruplarına

dönüştürülmesinin (Şekil 2) duyarlılığı azaltılabileceği varsayılmaktadır. HMX'ten türetilen moleküllerin balistik özelliklerinin anlaşılması, yapısal modifikasyon yoluyla patlayıcıların duyarlılığını değiştirmede kullanılabilecek faktörleri ortaya koymaktadır. Duyarsızlaştırma sayesinde türetilen moleküller, başlangıç molekülüne kıyasla çok daha güvenli patlayıcılar olabilir ve ısı, sıcaklık, çarpma, sürtünme ile statik elektrik deşarjı gibi çeşitli olayların oluşması ile meydana gelen kontrolsüz patlamaları önleyebilir.



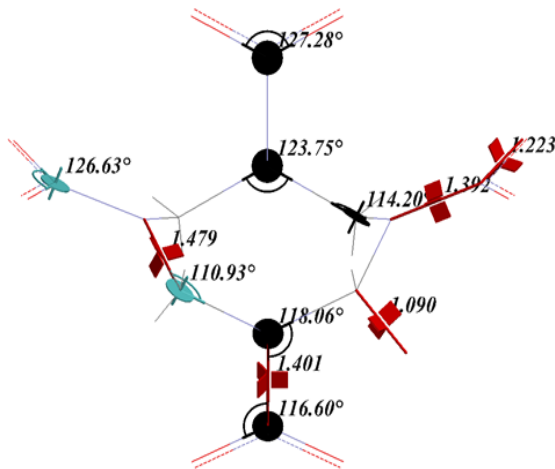
Şekil 2. HMX ve ondan üretilen moleküllerin şekilleri

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada incelenen moleküller için yapılan teorik hesaplamalar Spartan 14 ve Gaussian 03W paket programları ile B3LYP/6-31G** (d,p) temel setinde yapılmıştır [16,17].

Bu çalışmada, Spartan 14 paket programında HMX molekülünün üç boyutlu yapısı çizilerek, programın “calculations” ara yüzü açıldı. “calculate” bölümüne “Equilibrium Geometry” komutu, “compute” kısmına “IR” ve “Print” kısmına ise “Thermodynamics” komutları girildi. Temel durum ve geçiş durumu geometrileri ve

termodinamik özellikler gibi birçok amaç için güvenilir sonuçlar ortaya koyan [18-21] Hartree-Fock yöntemiyle vakumda moleküle sırasıyla STO-3G, 3-21G, 6-31G* ve 6-31G** temel setleri uygulandı. Akabinde HMX molekülüne Yoğunluk Fonksiyonu Teorisi DFT/B3LYP düzeyinde sırasıyla 6-31G* ve 6-31G** temel setleri uygulanarak molekülün geometrik optimizasyonu yapıldı. Bu sayede elde edilen yapı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Optimize edilmiş HMX molekülü

DFT/B3LYP düzeyinde 6-31G** temel sette HMX molekülünün enerji hesabı yapılarak çeşitli termodinamik özellikleri hesaplandı. Ardından, HMX molekülü için Spartan 14 programında Parametrizasyon metodu (PM3) kullanılarak, molekülün standart oluşum entalpi (ΔH_f°) değeri hesaplandı.

Enerjik bileşiklerin balistik niteliklerini etkileyen özelliklerden biri olan yoğunluğu hesaplamak için en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi Monte Carlo metodudur [8,23-25]. Bu nedenle optimize edilen HMX molekülünün teorik yoğunluk hesabını yapmak için Gaussian 03W paket programında yer alan Monte Carlo metodu kullanılarak molekülün molar hacmi 100 defa hesaplanmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Molekülün mol kütlelerinin bulunan ortalama molar hacmine bölünmesiyle HMX molekülü için teorik yoğunluk değeri hesaplanmıştır.

$C_6H_6O_6N_4$ molekül yapısına sahip patlayıcı molekülleri için kullanılan stokiyometrik ilişki ($2a+b/2 > c \geq b/2$ ise $N=(b+2c+2d)/4M$, $M=(56d+88c-8b)/(b+2c+2d)$, $Q=[28.9b+94.05(c/2-b/4)+0.239 \Delta H_f^\circ]/M$) [26] kullanılarak molekülün N, M ve Q değerleri hesaplanmıştır [27].

Eşitlik 1 ve 2'de verilen Kamlet-Jacobs denklemleri [26,28-30] kullanılarak HMX molekülünün teorik olarak patlama hızı (D) ve patlama basıncı (P) hesaplanmıştır.

$$D = 1,01 (N M^{1/2} Q^{1/2})^{1/2} (1+1,30 \rho) \quad (1)$$

$$P = 1,558 \rho^2 N M^{1/2} Q^{1/2} \quad (2)$$

D: Patlama hızı (km/s), P: Patlama basıncı (GPa), ρ : bileşiğin yoğunluğu (g/cm^3), N: patlayıcının gramı başına düşen patlama ürünlerinden oluşan gazın molü (mol/g), $M_{ort.}$: oluşan gaz ürünlerinin ortalama mol kütleleri (g/mol), Q: patlamanın kimyasal enerjisi (kJ/g).

Eşitlik 3 kullanılarak ise oksijen içeriği hesaplanmıştır [20].

$$\% \Omega = \frac{\mu_o}{\mu_{pat}} \left(c - 2a - \frac{b}{2} \right) \times 100 \quad (3)$$

Patlama reaksiyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkabilecek olası gaz ürünleri, Kistiakowsky-Wilson kuralları [22]:

- 1- Oksijen atomları, 'H' atomlarını 'H₂O' moleküllerine okside eder. ($2H + O \rightarrow H_2O_{(g)}$)
- 2- Kalan 'O' atomları, tüm 'C' atomlarını CO moleküllerine oksitler. ($C+O \rightarrow CO_{(g)}$)
- 3- Kalan 'O' atomları, tüm 'CO' moleküllerini 'CO₂' moleküllerine okside eder. ($CO+O \rightarrow CO_2_{(g)}$)
- 4- O, H ve N atomlarının fazlası O₂, H₂ ve N₂'ye dönüştürülür. Fazla C, C (katı) olarak kalır, ($2H \rightarrow H_{2(g)}$, $2N \rightarrow N_{2(g)}$, $2O \rightarrow O_{2(g)}$) yardımıyla belirlenmiştir.

HMX molekülü için elde edilen teorik değerlerle literatür değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarlanan yeni moleküller içinde yukarıda sunulan işlemler sırasıyla uygulanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Geometrilere

HMX ve ondan türetilen moleküllerin optimize edilmiş yapıları Şekil 4'de görülmektedir. Teorik olarak hesaplanmış bağ açıları ve bağ uzunlukları

ise sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. HMX molekülü için literatürden elde edilen değerler ile belirlenen veriler arasındaki ilişki değerlendirildiğinde paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu durum, moleküllerin geometri optimizasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. HMX molekülündeki NO₂ grubunun NO veya NH₂ ile yer değiştirmesi sonucu bağ uzunluklarının değiştiği görülmektedir. NH₂ ile yer değiştirdiğinde bağ uzunluğunun arttığı, NO eklenmesinde ise azaldığı görülebilmektedir.

Çizelge 1. HMX molekülü için bu çalışmada elde edilen ve literatür verilerinden elde edilen bağ açıları(°)

Bağ Açılı	HMX	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]
N-N-O	116,36-118,69	116,8	117	116,56	116,6-119,9	117,28
O-N-O	126,63-127,28	126,3	127	127,10	123,9-128,2	125,65
C-N-N	116,72-113,58	117,3	117		115,9-114,3	119,94
C-N-C	123,64-123,75	123,1	122	123,15	124,3-125,3	
N-C-H	109,45-109,05					109,86
N-C-N	114,20-110,93	111,8	114	111,23	114,4-108,7	

Çizelge 2. HMX ve ondan türetilen moleküller için elde edilen bağ uzunlukları(Å) a:[36], b: [37], c: [33]

Bağ Uzunluğu	HMX	Literatür	1	2	3	4	5	6
N1-C1	1,450	1,450 ^b	1,480	1,500	1,466	1,453	1,454	1,453
C1-N2	1,456	1,450 ^a	1,439	1,454	1,479	1,456	1,447	1,448
N2-C2	1,456	1,458 ^a	1,438	1,466	1,473	1,451	1,454	1,456
C2-N3	1,450	1,447 ^a	1,486	1,489	1,473	1,453	1,458	1,452
N3-C3	1,450	1,451 ^c	1,449	1,479	1,495	1,450	1,451	1,452
C3-N4	1,456	1,456 ^a	1,456	1,467	1,466	1,456	1,454	1,456
N4-C4	1,456	1,453 ^c	1,460	1,468	1,454	1,453	1,450	1,448
C4-N1	1,450	1,452 ^c	1,446	1,469	1,501	1,453	1,455	1,453
N1-4-NO2	1,404	1,405 ^a	1,399	1,453	1,436	1,413	1,401	1,402
N2-1-NO2	1,416	1,413 ^b	1,421	1,442	1,507	1,377	1,378	1,381
N3-2-NO2	1,404	1,398 ^c	1,388	1,511	1,434	1,411	1,375	1,402
N4-3-NO2	1,416	1,416 ^a	1,410	1,432	1,431	1,402	1,410	1,381

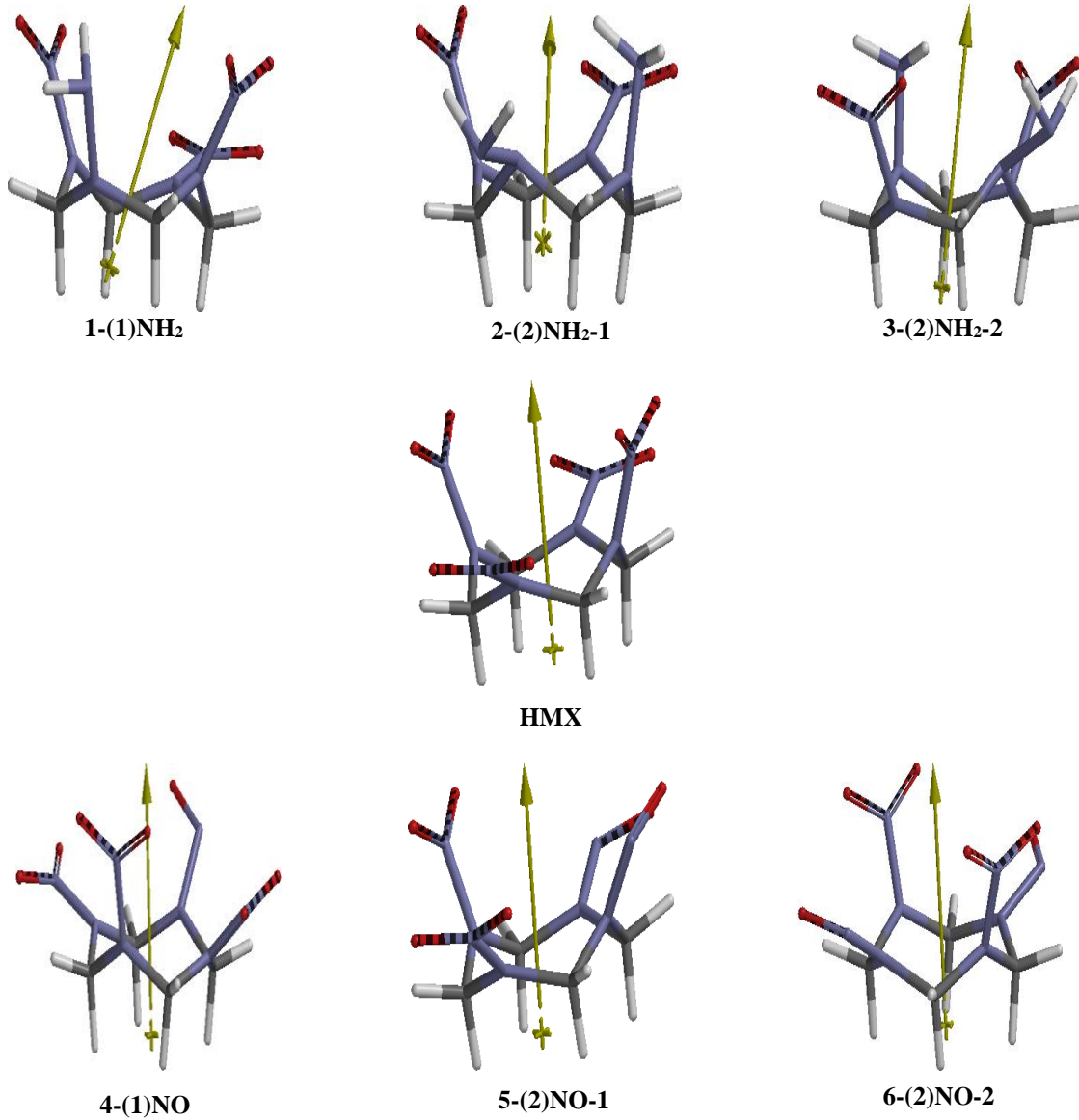
3.2. Elektrostatik Potansiyel

Elektrostatik potansiyellerin belirlenmesi sayesinde, molekülün üç boyutlu olarak yük dağılımları, kimyasal tepkimelere girme eğilimi, hidrojen bağı etkileşimleri, elektronca zengin yani pozitif yüklü (elektrofilik) bölgeler veya tam tersi (nükleofilik) bölgeler tespit edilebilmektedir [38-39]. Kısaca molekülün fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesinde çok faydalı olduğu

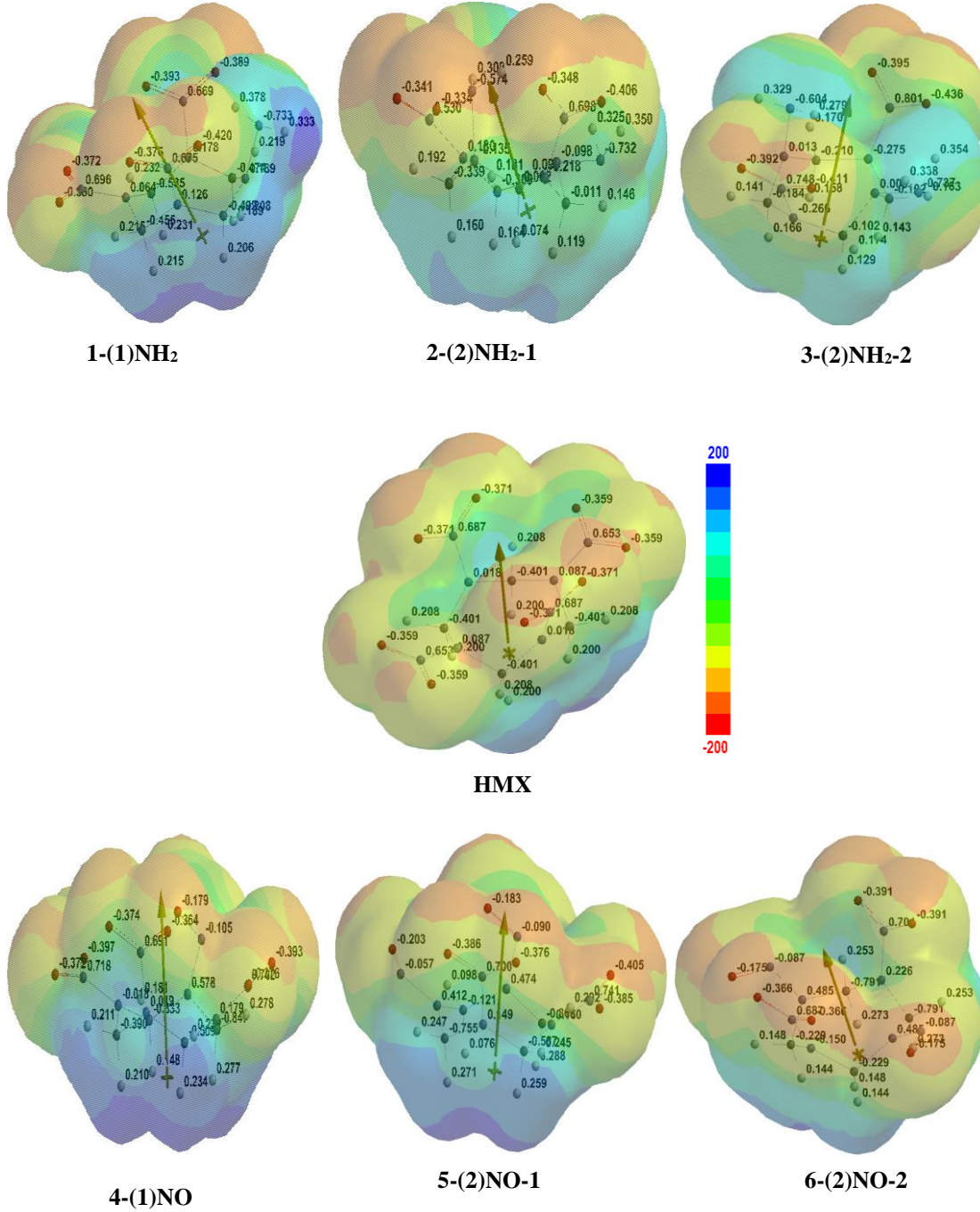
bilinmektedir. Elektron yoğunluğunun az olduğu bölgelerde atom çekirdeğinin protonu itmesinden oluşan potansiyel (+) yüklü elektrostatik potansiyel olarak bilinir ve mavi renk ile gösterilmektedir. Elektron yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde protonun çekilmesiyle oluşan potansiyel (-) yüklü potansiyel olarak bilinir ve kırmızı renk ile gösterilmektedir. Moleküldeki atomların etkileşimleri veya diğer moleküllerle olan etkileşimlerini anlayabilmek için bu bölgelerin

belirlenmesi önem arz etmektedir. HMX ve ondan türetilen moleküller için DFT/B3LYP düzeyinde 6-31G** temel setinde elde edilen $V(r) = 0,001$ au izodensite yüzeyinde eşlenen elektrostatik potansiyeller Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde, elektron yoğunluğunun fazla olduğu (kırmızı) bölgelerin oksijen (O) atomları

civarında ve az olduğu (mavi) bölgelerin hidrojen (H) atomları ve N-H civarında olduğu görülmektedir. Nitro (NO_2) grupları yerine amino (NH_2) ve nitrozo (NO) gruplarının gelmesi ile bir miktar yoğunluk azalmaktadır ve en düşük yoğunluk 3-(2) NH_2 -2 için tespit edilmiştir.



Şekil 4. HMX ve ondan türetilen moleküllerin optimize şekilleri



Şekil 5. HMX ve ondan türetilen moleküllerin $V(r) = 0,001$ au üzerinde eşlenen elektrostatik potansiyeller, -200 (kırmızı) ile +200 (mavi) arasında değişen izodensite yüzeyi

3.3. Balistik Özellikleri

Patlayıcı maddeler, çarpma, şok, kıvılcım v.b. bir etkiye maruz kaldıklarında kendi kendine ilerleyen son derece hızlı ve karmaşık kimyasal reaksiyonlar oluştururlar. Sürecin hızlı olması nedeniyle yanma reaksiyonu için gerekli oksijen havadan sağlanamaz ve molekülün yapısındaki oksijenlerle tepkime devam eder [40]. Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanan oksijen dengesi (% Ω), molekülün oksitlenebilme ölçüsü olarak ifade edilebilir. Bir patlayıcı molekülü yapısındaki karbon (C),

hidrojen (H), azot (N) ve yapısında olan metallere oksit üretebilecek oksijene sahip olması durumunda, sıfır oksijen dengesine sahiptir (Çizelge 3- EGDN). Molekülün ihtiyaç duyulandan fazla oksijene sahip olması durumunda pozitif oksijen dengesine (Çizelge 3- Nitrogliserin) ve tersinde ise negatif oksijen dengesine (Çizelge 3- Pikrik asit) sahip olması gerekmektedir. Bu çalışmadaki tüm moleküller, askeri çalışmalarda sıklıkla kullanılan TNT ve RDX gibi negatif oksijen dengesine sahiptir.

Çizelge 3. Bazı patlayıcı moleküllerinin, HMX ve onun türevlerinin oksijen değerleri

Patlayıcı	Kimyasal formülü	% Ω
Nitrogliserin	$C_3H_5N_3O_9$	3,50
EGDN (Etilen glikol dinitrat)	$C_2H_4N_2O_6$	0,00
PETN	$C_5H_8N_4O_{12}$	-10,13
RDX (Siklotrimetilen-trinitramin)	$C_3H_6N_6O_6$	-21,60
Pikrik asit (1-Hydroxy-2,4,6-trinitrobenzene)	$C_6H_3N_3O_7$	-45,40
HMX	$C_4H_8N_8O_8$	-21,62
1	$C_4H_{10}N_8O_6$	-42,08
2	$C_4H_{12}N_8O_4$	-67,74
3	$C_4H_{12}N_8O_4$	-67,74
4	$C_4H_8N_8O_7$	-28,55
5	$C_4H_8N_8O_6$	-36,34
6	$C_4H_8N_8O_6$	-36,34
TNT (Trinitrotoluen)	$C_7H_5N_3O_6$	-73,98

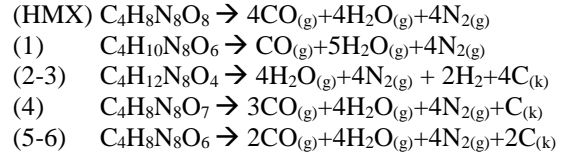
Balistik özellikler, patlama basıncı ve patlama hızı olmak üzere iki önemli değişkenden oluşmaktadır. Patlayıcı bileşiklerin balistik niteliklerini etkileyen özelliklerden biri olan yoğunluk hesabı için Monte Carlo metodu, Eşitlik 1 ve 2'de verilen Kamlet-Jacobs denklemleri kullanılarak HMX

molekülünün teorik olarak patlama hızı (D) ve patlama basıncı (P) hesaplanmış ve Çizelge 4'de verilmiştir. Çizelge 4'den görüleceği üzere bu çalışmada elde edilen değerler ile literatür verileri uyum içerisinde.

Çizelge 4. HMX molekülü için gaz fazında yoğunluk, patlama hızı ve patlama basıncı değerlerinin literatür verileri ve bu çalışmada elde edilen değerler

	HMX	[13]	[21]	[41]	[42]	[43]	[44]	[45]	[46]
P (g/cm^3)	1,907	1,90	1,89	1,90	1,91	1,91	1,90	1,91	1,9
D (km/s)	9,24	9,10	9,03	9,10	9,20	9,25	8,89	9,32	9,14
P (GPa)	39,19	39,30	39,00	39,00	38,90	39,31	36,2	39,6	39,5

HMX ve ondan türetilen moleküllerin Kistiakowsky-Wilson kuralları [22] uygulanarak olası reaksiyon ürünleri aşağıdaki şekilde verilmiş olup patlama sonrası oluşabilecek toplam gaz miktarları Çizelge 5'de görülmektedir.



Çizelge 5. HMX ve ondan türetilen moleküllerin patlama sonrası oluşabilecek olası gaz molekülleri.

	Formül	N ₂	H ₂ O	CO	H ₂	C _(k)	N Toplam gaz
HMX	C ₄ H ₈ N ₈ O ₈	4	4	4	-	-	12
1	C ₄ H ₁₀ N ₈ O ₆	4	5	1	-	3	10
2	C ₄ H ₁₂ N ₈ O ₄	4	4	-	2	4	10
3	C ₄ H ₁₂ N ₈ O ₄	4	4	-	2	4	10
6	C ₄ H ₈ N ₈ O ₇	4	4	3	-	1	11
7	C ₄ H ₈ N ₈ O ₆	4	4	2	-	2	10
8	C ₄ H ₈ N ₈ O ₆	4	4	2	-	2	10

Çizelge 6'da HMX ve ondan türetilen moleküllerin B3LYP düzeyinde 6-31G** temel setinde elde edilen ve hesaplamalar yapılarak bulunan balistik özelliklerle ilgili TNT < PA < 2 < 3 < 1 < 6 < 5 < 4 < HMX şeklinde bir performans sıralaması yapılabilir. Nitro (NO₂) gruplarının nitrozo (NO) grupları ve amino (NH₂) grupları ile yer değiştirmesi balistik özellikleri azaltırken, amino gruplarındaki düşüş nitrozo gruplarına göre daha fazladır. Yoğunluklar bakımından değerlendirme

yapılacak olursa yine aynı şekilde amino gruplarının nitrozo gruplarına göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 6'da verilen oluşum ısısı (ΔH_f°) değerleri Parametrizasyon metodu (PM3) T1 enerji düzeyinde kullanılarak gaz fazında hesaplanmıştır [15]. Patlama basıncı ve patlama hızı her bir molekül için patlama tepkimelerinin oksijen dengesi (Ω) kurallarına uydukları varsayılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6. HMX ve ondan türetilen moleküller için elde edilen teorik sonuçlar.

	ρ (g/cm ³)	% Ω	V (cm ³ /mol)	N (mmol/g)	M (g/mol)	Q (kJ/g)	ΔH_f° (kJ/mol)	D (km/s)	P (GPa)
HMX	1,907	-21,61	155,29	33,77	27,20	1542,05	156,43	9,24	39,19
1	1,813	-42,08	146,82	35,69	23,58	1439,87	197,62	8,69	33,68
2	1,687	-67,74	140,09	38,11	19,56	1311,26	238,32	7,97	27,06
3	1,699	-67,74	139,03	38,10	19,56	1313,57	240,61	8,01	27,47
4	1,889	-28,55	148,30	33,91	26,32	1509,29	211,56	9,07	37,57
5	1,888	-36,34	139,94	34,10	25,33	1472,30	266,43	8,95	36,53
6	1,873	-36,34	141,02	34,11	25,33	1473,80	268,10	8,90	35,99
*Pikrik asit (1-Hydroxy-2,4,6-trinitrobenzene, PA)								7,85	27,72
*TNT (Trinitrotoluen)								7,37	23,46

*[47]

Amino grubu değişimlerinin (Çizelge 6-1, 2 ve 3) ve nitrozo grubu değişimlerinin (Çizelge 6- 4, 5 ve 6) duyarlılığı azaltmada etkili oldukları görülmektedir. Ancak amino grubu değişimleri, balistik özelliklerde ana yapıya göre çok fazla değişikliğe sebep olduğu için duyarlılığı azaltmada nitrozo grubu değişimleri daha etkin bir yoldur.

Patlama reaksiyonu sonunda ortama sıcak gaz ve ısı verildiği bilinmektedir. Açığa çıkan gazın hacmi patlayıcı molekülün yapmış olduğu iş ile ilgili bilgi verebilir [48-52]. Bu nedenle oluşan gazın hacmini belirlemek için standart koşullarda (273 K, 1 atm, 22,4 L) hesaplama yapmak gerekir. Patlamada oluşan toplam gaz hacminin molekül ağırlığına bölünmesiyle bir gram patlayıcı

molekülü başına ne kadar gaz açığa çıkacağı bulunabilir.

Patlayıcının gücü, patlama ısı (Q) ve oluşan gazın hacminin (v) çarpımı olarak gösterilebilir [22].

$$\text{Patlayıcı Gücü} = Q \cdot v \quad (4)$$

Eşitlik 5 yardımıyla, her bir molekül için hesaplanan güç değerleri, Pikrik Asit (PA) güç değeri ile kıyaslanarak güç endeksi verileri elde edilebilir (Çizelge 7).

$$\% \text{ Güç Endeksi} = \frac{Q \cdot v}{Q_{PA} \cdot v_{PA}} \times 100 \quad (5)$$

Çizelge 7’de görüleceği üzere HMX ve ondan türetilen moleküllerin güç endeksi değerleri % 106,09 ile 118,86 arasındadır ve $HMX > 4 > 6 > 5 > 3 > 2 > 1 > PA > TNT$ şeklinde sıralanabilir. HMX’ten türetilen tüm yapıların, geniş çapta kullanılan PA ve TNT gibi patlayıcılardan daha yüksek güç endeksine sahip oldukları görülmektedir.

Çizelge 7. Pikrik asit, TNT, RDX, HMX ve ondan türetilen moleküllerin güç endeksi verileri

Bileşik	Q (kJ·g ⁻¹)	v (dm ³ ·g ⁻¹)	Q* v	% Güç Endeksi
HMX	1542,05	0,908	1400,18	118,86
1	1439,87	0,842	1212,37	102,92
2	1311,26	0,949	1244,39	105,63
3	1313,57	0,949	1246,58	105,82
4	1509,29	0,879	1326,67	112,62
5	1472,30	0,848	1248,51	105,98
6	1473,80	0,848	1249,78	106,09
PA (Pikrik Asit)	1417,61	0,831	1178,03	100,00
TNT(Trinitrotoluen)	1424,11	0,740	1053,35	89

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

HMX molekülünün DFT/B3LYP düzeyinde 6-31G** temel setinde optimizasyonu yapılarak belirlenmiş olan bağ uzunluğu ve bağ açıları verilerinin literatür değerleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. HMX’in nitro (NO₂) gruplarının nitrozo (NO) grupları ve amino (NH₂) gruplarına dönüştürülmesiyle bir patlayıcının duyarlılığını önemli bir güç kaybı olmadan, özellikle nitrozo gruplarının azaltma olasılığı kanıtlanmıştır. Türetilen bütün moleküllerin, TNT (Trinitrotoluen) ve PA’dan (Pikrik asit) daha iyi birer patlayıcı oldukları görülmektedir. Nitro (NO₂) gruplarının amino (NH₂) gruplarına dönüştürülmesi, nitrozo (NO) dönüşümlerine kıyasla daha duyarlı patlayıcılar oluşturmaktadır. Düşük hassasiyetli uygulamalar gerektiğinde, türetilen moleküllerin herhangi biri kullanılabilir. Bu çalışma, moleküler modifikasyonun HMX’in duyarlılaştırılmasında etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

4. KAYNAKLAR

1. Mamand, D.M., 2019. Theoretical Calculations and Spectroscopic Analysis of Gaussian Computational Examination-NMR, FTIR, UV-Visible, MEP on 2,4,6-Nitrophenol. Journal of Physical Chemistry and Functional Materials, 2(2), 77-86.
2. Priya, M.K., Revathi, B.K., Renuka, V., Sathya, S., Asirvatham, P.S., 2019. Molecular Structure, Spectroscopic (FT-IR, FT-Raman, 13C and 1H NMR) Analysis, HOMO-LUMO Energies, Mulliken, MEP and Thermal Properties of New Chalcone Derivative by DFT Calculation. Materials Today: Proceedings, 8, 37-46.
3. Al-Ahmary, K.M., Habeeb, M.M., Aljahdali, S.H., 2019. Synthesis, Spectroscopic Studies and DFT/TD-DFT/PCM Calculations of Molecular Structure, Spectroscopic Characterization and NBO of Charge Transfer Complex Between 5-amino-1,3-

- dimethylpyrazole (5-ADMP) with Chloranilic Acid (CLA) in Different Solvents. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 453-470.
4. Wu, X., Liu, Z., Ji, G., Zhu, W., 2019. Pressure-induced Structure, Vibrational Properties, and Initial Decomposition Mechanisms of Delta-HMX Crystal: A Periodic DFT Study. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 90, 144-152.
 5. Bari, R., Koh, Y.P., McKenna, G.B., Simon, S.L., 2020. Decomposition of HMX in Solid and Liquid States Under Nanoconfinement. *Thermochimica Acta*, 686.
 6. Bondarchuk, S.V., 2020. Modeling of Explosives: 1,4,2,3,5,6-dioxatetrazinane as a New Green Energetic Material with Enhanced Performance. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 142.
 7. Zeng, Y., Song, Y., Yu, G., Zheng, X., 2016. A Comparative Study of 1,3,5-Trinitroperhydro-1,3,5-triazine (RDX) and Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX) Under High Pressures Using Raman Spectroscopy and DFT Calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1119, 240-249.
 8. Jeong, K., Sung, I., Uk Joo, H., Kwon, T., Yuk, J.M., Kwon, Y., Kim, H., 2020. Molecular Design of Nitro-oxide-substituted Cycloalkane Derivatives for High-energy-density Materials. *Journal of Molecular Structure*, 1212.
 9. Wang, P., Wang, J., Wang, J., 2020. Crystal Structure and Thermal Decomposition Kinetics of 1,3,5-trinitro-4,6-diazidobenzene. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 3983-3995.
 10. Türker, L., 2019. Epoxides of DADNE Isomers-A DFT Study. *Earthline Journal of Chemical Sciences*, 121-139.
 11. Shi, Y.B., Bai, L.F., Li, J.H., Sun, G.A., Gong, J., Ju, X., 2019. Theoretical Calculation into the Effect of Molar Ratio on the Structures, Stability, Mechanical Properties and Detonation Performance of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocane/ 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacyco-hexane Cocrystal. *Journal of Molecular Modeling*, 25(9), 299.
 12. Shi, Y., Bai, L., Gong, J., Ju, X., 2019. Theoretical Calculation into the Structures, Stability, Sensitivity, and Mechanical Properties of 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12 hexaazai-sowurtzitan (CL-20)/1-amino-3-methyl-1,2,3-triazoliumnitrate (1-AMTN) coCRYSTAL and its Mixture. *Structural Chemistry*, 31(2), 647-655.
 13. Lin, H., Zhu, Q., Huang, C., Yang, D.D., Lou, N., Zhu, S.G., Li, H.Z., 2019. Dinitromethyl, Fluorodinitromethyl Derivatives of RDX and HMX as High Energy Density Materials: a Computational Study. *Structural Chemistry*, 30(6), 2401-2408.
 14. Lin, H., Yang, D.D., Lou, N., Zhu, S.G., Li, H.Z., 2019. Theoretical Design and Screening Potential High Energy Density Materials: Combination of 1,2,4-oxadiazole and 1,3,4-oxadiazole Rings. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 55(5), 547-554.
 15. Türker, L., Variş, S., 2017. Structurally Modified RDX-A DFT Study. *Defence Technology*, 13(6), 385-391.
 16. Spartan, 2005. *Molecular Modeling in Physical Chemistry*, 52-57.
 17. Frisch, M.J., Trucks, G., Schlegel, H.B., Scuseria, G.E., Robb, M., Cheeseman, J., Jr, J.A., Vreven, T., Kudin, K.N., Burant, J.C., 2004. Gaussian 03, Revision D.01. Gaussian, Inc., Wallingford, CT.
 18. Türker, L., 2019. Interaction of TATB with Cu and Cu+1. A DFT Study. *Defence Technology*, 15(1), 27-37.
 19. Young, D.C., 2001. *Computational Chemistry: A Practical Guide for Applying Techniques to Real-World Problems*. John Wiley & Sons, Inc.
 20. Türker, L., Variş, S., 2013. Prediction of Explosive Performance Properties ofz-DBBD and its Isomers by Quantum Chemical Computations. *Journal of Energetic Materials*, 31(3), 203-216.
 21. Wu, Q., Yan, G., Li, M., Hu, Q., Zhang, Z., Zhu, W., 2020. Density Functional Theory Studies of Effects of Boron Replacement on the Structure and Property of RDX and HMX. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 67(11), 1977-1985.
 22. Akhavan, J., 1998. *The Chemistry of Explosives United Kingdom: RSC Paperback* 37-38, 73-74.
 23. Yang, J., Wang, F., Zhang, J., Wang, G., Gong, X., 2013. A Theoretical Study on 1,5-diazido-

- 3-nitrazapentane (DANP) and 1,7-diazido-2,4,6-trinitrazaheptane (DATNH): Molecular and Crystal Structures, Thermodynamic and Detonation Properties, and Pyrolysis Mechanism. *Journal of Molecular Modeling*, 19(12), 5367-76.
24. Pu, K., Wang, L., Liu, J., Zhong, K., 2020. Theoretical Design of Bis-azole Derivatives for Energetic Compounds. *RSC Advances*, 10(22), 13185-13195.
25. Wang, G., Xu, Y., Zhang, W., Gong, X., 2019. A Theoretical Study of Polyethylene Glycol Polynitrates as Potential Highly Energetic Plasticizers for Propellants. *Central European Journal of Energetic Materials*, 16(2), 194-215.
26. Qiu, L., Xiao, H., Gong, X., Ju, X., Zhu, W., 2006. Theoretical Studies on the Structures, Thermodynamic Properties, Detonation Properties, and Pyrolysis Mechanisms of Spiro Nitramines. *The Journal of Physical Chemistry A*, 110, 3797-3807.
27. Qiu, L., Xiao, H., Gong, X., Ju, X., Zhu, W., 2006. Theoretical Studies on the Structures, Thermodynamic Properties, Detonation Properties, and Pyrolysis Mechanisms of Spiro Nitramines. *Journal of Computational Chemistry A*, 110(10), 3797-3807.
28. Kamlet, M.J., Jacobs, S.J., 1968. Chemistry of Detonations. I. A Simple Method for Calculating Detonation Properties of C H N O Explosives. *The Journal of Chemical Physics*, 48, 23-25.
29. Kamlet, M.J., Short, J.M., 1980. The Chemistry of Detonations. VI. A "Rule for Gamma" as a Criterion for Choice Among Conflicting Detonation Pressure Measurements. *Combustion and Flame*, 38, 221-230.
30. Jeong, K., 2018. New Theoretically Predicted RDX- and β -HMX-based High-energy-density Molecules. *International Journal of Quantum Chemistry*, 118(6), 1-7.
31. Choi, C.S., Boutin, H.P., 1970. A Study of the Crystal Structure of [β]-cyclotetramethylene Tetranitramine by Neutron Diffraction. *Acta Crystallographica*, B26, 1235-1240.
32. Lewis, J.P., 2003. Energetics of Intermolecular HONO Formation in Condensed-phase octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX). *Chemical Physics Letters*, 371(5-6), 588-593.
33. Damian, G.A., Darya, A.P., Timothy, M.K., 2006. Solid-State Modeling of the Terahertz Spectrum of the High Explosive HMX. *Journal of Physical Chemistry A* 110, 1951-1959.
34. Palmer, S.J.P., Fieldf, J.E.,F., 1982. The Deformation and Fracture of (β -HMX). *Proceedings of the Royal Society of London*, A 383, 399-407.
35. Lu,L.Y., Wei, D.Q., Chen, X.R., Ji, G.F., Wang, X.J., Chang, J., Zhang, Q.M., Gong, Z.Z., 2009. The Pressure-induced Phase Transition of the Solid β -HMX. *Molecular Physics*, 107(22), 2373-2385.
36. Shaowen, Z., Thanh, N.T., 2000. Thermal Rate Constants of the NO₂ Fission Reaction of Gas Phase β -HMX: A Direct ab Initio Dynamics Study. *Journal of Physical Chemistry A* 104, 7304-7307.
37. Lewis, J.P., Glaesemann, K.R., VanOpdorp, K., Voth, G.A., 2000. Ab Initio Calculations of Reactive Pathways for r-Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (β -HMX). *J. Phys. Chem. A*, 104, 11384-11389.
38. Gümüş, H., 2019. Nikotinamid İçeren Çinko (II) Kompleksinin Moleküler Özellikleri ve Titreşim Spektrumu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 254-261.
39. Göcen T., Güven M.H., 2020. Palmitoleik Asidin Moleküler Yapısı, Titreşim Spektrumları ve Elektronik Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 553-573.
40. Bozkuş, S.İ., Şen, N., 2019. 2,4,6-Trinitrofenol ve Trinitrotoluen ile 1-Bromopiren Arasında Oluşan Yeni Enerjik Ko-kristalin Karakterizasyonu ve Enerjik Performans Özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fen Dergisi*, 14, 136-149.
41. Talawar, M.B., Sivabalan, R., Mukundan, T., Muthurajan, H., Sikder, A.K., Gandhe B.R., Rao, S., 2009. Environmentally Compatible Next Generation Green Energetic Materials (GEMs). *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 589-607.

42. Pan, Y., Zhu, W., Xiao, H., 2013. DFT Studies on Trinitromethyl- or Dinitromethyl-modified Derivatives of RDX and β -HMX, Computational and Theoretical Chemistry, 1019, 116-124.
43. Jeon, W.C., Lee, H.Y., Kim, J.C., Kang, S.J., jung, S.H., Cho, S.G., Kwak, S.K., 2020. Reaction Kinetics of Mixture of Nitromethane and Detonator Confined in Carbon Nanotube. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 83, 64-71.
44. Shang, Y., Huang, R.K., Chen, S.L., He, C.T., Yu, Z.H., Ye, Z.M., Zhang, W.X., Chen, X.M., 2020. Metal-Free Molecular Perovskite High-Energetic Materials. Crystal Growth & Design, 20(3), 1891-1897.
45. Zhang, Y., Li, Y., Hu, J., Ge, Z., Sun, C., Pang, S., 2019. Energetic C-trinitromethyl-substituted Pyrazoles: Synthesis and Characterization. Dalton Transactions, 48(4), 1524-1529.
46. Liu, J., Liu, L., Liu, X., 2019. Development of High-energy-density Materials. Science China Technological Sciences, 63(2), 195-213.
47. Wang, G., Xiao, H., Ju, X., Gong, X., 2006. Calculation of Detonation Velocity, Pressure, and Electric Sensitivity of Nitro Arenes Based on Quantum Chemistry. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 31(5), 361-368.
48. Xu, W., Guo, F., Liang, X., Yan, T., Xu, Y., Deng, J., Li, Y., Wang, J., 2021. Dynamic Response Properties of Polymer Bonded Explosives Under Different Excitation by Deceleration. Materials & Design, 206, 109810-109825.
49. Perry, W. L., Duque, A. L., Mang, J. T., Culp, D.B., 2021. Computing Continuum-level Explosive Shock and Detonation Response Over a Wide Pressure Range from Microstructural Details. Combustion and Flame, 231, 111470-111483.
50. Liu, D., Zhao, P., Chan, S.H., Hng, H.H., Chen, L., 2021. Effects of Nano-sized Aluminum on Detonation Characteristics and Metal Acceleration for RDX-based Aluminized Explosive. Defence Technology, 17(2), 327-337.
51. Bondarchuk, S.V., 2021. Diazoamination: A Simple way to Enhance Detonation Performance of Aminoaromatic and Aminoheterocyclic Energetic Materials. Fire Phys Chem, 1(2), 97-102.
52. Choi, S., Kim, B., Han, S., Yoh, J.J., 2020. Multiscale Modeling of Transients in the Shock-induced Detonation of Heterogeneous Energetic Solid Fuels. Combustion and Flame, 221, 401-415.

Agro-Endüstriyel Atık Olan Elma Posalarının Box-Behnken Yanıt Yüzey Metodolojisi ile Alkali Ön İşlem Optimizasyonu

Özgecan MADENLİ*¹, Ece Ümmü DEVECİ¹

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Niğde

Geliş tarihi: 02.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Agro-endüstriyel atıklar lignoselülozik yapıya sahip biyokütlelerdir. Biyokütleler ön işlem yöntemleri ile fermente şeker olarak geri kazanılması biyoyakıt üretiminde büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada basınçlı ve basınçsız ortamlarda alkali potasyum hidroksit (KOH) ile elma posası atıklarının ön işlemi yöntemiyle toplam şeker ve indirgenmiş şeker potansiyeli yanıt yüzey metodolojisi olan Box Behnken istatistiksel modeli ile incelenmiştir. Optimum çalışma koşulları zaman (30-90 dk), KOH dozu (%1-3) ve katı oranı (%2,5-7,5) olarak incelenmiştir. Alkali potasyum hidroksit ön işleminde basınçlı ortamda reaksiyon süresi 60 dakikada ve %5 katı oranında toplam şeker miktarının 22,36 g/L'ye ulaştığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali ön işlem, Elma posası, Yanıt yüzey metodolojisi, Biyoyakıt potansiyeli

Alkaline Pre-Treatment Optimization of Agro-Industrial Waste Apple Pulp with Box-Behnken Response Surface Methodology

Abstract

Agro-industrial wastes are biomass with lignocellulosic structure. The recovery of biomass as fermented sugar by pre-treatment methods is of great importance in biofuel production. Pre-treatment methods such as physical, chemical, physico-chemical, biological and combined are applied to agro-industrial wastes. In this study, the total sugar and reduced sugar potential in pressurized and non-pressurized environments by pretreatment of alkali potassium hydroxide (KOH) and apple pulp wastes were investigated with the Box Behnken statistical model, which is the response surface methodology. Optimum working conditions were examined as time (30-90 min), KOH dose (1-3%) and solids ratio (2.5-7.5%). In alkali potassium hydroxide pre-treatment, the reaction time in pressurized medium was 60 minutes and the total sugar amount at 5% solid rate reached 22,36 g/L.

Keywords: Alkali pretreatment, Apple pulp, Response surface methodology, Biofuel potential

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Özgecan MADENLİ, ozgemadenli@gmail.com

1. GİRİŞ

Şuan gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde dahil tüm dünya petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan enerji üretmektedir [1]. Kullanılan yakıt kaynaklarının sürdürülemez olmasının yanında tüketimi esnasında atmosfere sera gazı emisyonu salınımına yol açmaktadır. Sanayi devriminden bu zamana kadar fosil yakıtlardan kaynaklı CO₂ emisyonu yaklaşık 416,08 ppm düzeyindedir. Bu durum dünyanın sıcaklığını arttırmaktadır. Kontrolü sağlanmadığı sürece bu yüzyılda CO₂ emisyon miktarı 550 ppm'i geçeceği ön görülmektedir [2].

İklim değişikliğine uyum sağlayacak, CO₂ emisyonlarını azaltacak ve artan enerji talebi ihtiyacını karşılayacak yenilenebilir enerji türü olan biyoyakıtlardır [3]. Biyokütle temelli yakıtlar yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğinden dolayı sürdürülebilir yakıtlar olarak adlandırılmaktadır [4].

Biyoyakıt üretimi, üretim esnasında kullanılacak biyokütle türüne bağlı olarak 3 nesile ayrılmaktadır [5]. Birinci nesil biyoyakıtlar genel olarak yapılarında şeker, nişasta ve yağ depolayan bitki türlerinden elde edilmektedir. Bu tür biyoküteller ile biyoyakıt üretmek ucuz ve kolay olmaktadır [6]. Fakat güvenli ve temiz gıdaya ulaşmanın zorluğu göz önünde bulundurulduğunda tarım alanlarının enerji bitkisi yetiştiriciliğinde kullanılması istenmemektedir [7]. Gıda üretiminde yaşanacak sorunların yarattığı endişeden dolayı tarımsal gıda endüstrilerinin yan ürünlerinden biyoyakıt üretimine olan talep her geçen gün artmaktadır [8]. Bu şekilde ucuz hammadde kaynağı ile doğa dostu, ekonomik biyoyakıt üretmek mümkündür.

Tarımsal sanayi atıklar, geniş bir ürün çeşidine sahiptir. Bunlardan en önemlileri mahsul, hayvan atıkları ve tarımsal endüstri atıklarıdır [9]. Tarımsal endüstriyel atıklar odunsu selülozik bir yapıya sahip biyokütle olmasından dolayı enerji, yakıt ve kimyasal üretim için hammadde olarak

kullanılması büyük önem arz etmektedir [10]. Biyokütlenin ön işleme tabi tutulması, enzimatik hidroliz sırasında fermente olabilen şekerlerin verimli şekilde üretimini sağlamaktadır [11]. Ön işlem sırasında kullanılacak yöntemler ekonomik olmasının yanı sıra reaksiyonları engelleyecek herhangi toksik bileşiklerin oluşumunu engellemelidir. [12]. Asit, alkali, hidrojen peroksit, enzimatik, ultrason, termal uygulama ve basınç teknikleri gibi biyokütlenin yakıt üretim kapasitesini arttırmak için bazı etkili ön işlem teknikleridir. Ayrıca biyokütlenin hammadde olarak ön işlemde geçirilmesi mikroorganizmaların biyokütleyi daha kolay kullanabilmesine ve işlenmemiş biyokütleyle göre çok daha fazla miktarda dönüşüm gerçekleştirdiğinden dolayı biyoyakıt üretim maliyetini düşürebilmektedir [13,14]. Tüm bu bilgiler göz önünde bulundurularak ön işlem yöntemlerinden hangisinin en uygun olduğuna maliyet, uygulama kolaylığı ve çevreye duyarlılığı açısından test edilerek karar verilmektedir [10].

Alkali ön işlemler biyokütlenin, lignin ve ksilani bağlayan ester bağlarını bozarak lignoselülozik yapıyı etki hale getirerek hem selüloz hem de hemiselüloz bakımından zenginleştirmektedir [15]. Alkali ön işlem uygulamaları diğer ön işlem proseslerine göre düşük sıcaklık, basınç ve daha kısa alıkonma süresi kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit, amonyak, peroksit, potasyum hidroksit ve kireç gibi alkali kimyasallar ön işlem proseslerinde tercih edilmektedir. Bu alkali ön işlemler daha uygun maliyetli ve daha düşük enzim oranları ile selülozu glikoza dönüştürmektedir [16].

Lignoselülozik yapıya sahip biyoküteller seyreltik alkali ön işleminden geçirilerek hidrolizatların verimliliğini değerlendirmişlerdir [16,17]. Çoğunlukla alkali ön işlem çalışmalarında şeker verimleri ve monosakkarid yapıların değişimleri incelenerek detaylandırılmıştır. Biyokütlenin hidrolize edilmesi ve yüksek yakıt potansiyeline ulaşılması için en uygun parametreler belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada tarımsal endüstriyel atık olan elma posası atıklarının biyoyakıt dönüşüm potansiyelini arttırmak amacıyla potasyum hidroksit (KOH) ile basınçlı ve basınçsız ortamda ön işlem uygulamaları değerlendirilmiştir. Ön işlem sürecinin bağımsız faktörlerini optimize etmek için Box-Behnken'in istatistiksel deneysel yöntemi kullanılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lignoselülozik biyo kütle, bol, çevreye zararsız ve sürdürülebilir olduğu için günümüzün enerji ve çevresel endişelerini gidermek için çok uygundur. Lignoselülozik ön işlemlerde kaydedilen ilerlemeler incelendiğinde alkali ön işlemin lignoselülozik biyo kütle bozunması toksik olmayan ve düşük maliyetli işlemler olarak ortaya çıkmıştır. Farklı alkali kimyasallarla yaptıkları ön işlem karşılaştırmasında KOH'a göre NaOH ön işleminin en yüksek alkali konsantrasyonunda sıcaklığında ve en düşük reaksiyon süresinde enerji kazanım oranının daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir [18]. Alkali ön işlem olarak KOH tercih edilmesinin nedenlerinden biri de yapılan alkali ön işlem çalışmalarında biyo kütlelerin biyo-dönüşümünün sıfır emisyonunu gerçekleştirmek için daha çevre dostu bir alkali olarak tercih edilmesi gerektiği rapor edildiğindedir [19]. Fermente şeker üretiminin daha temiz ve sürdürülebilir bir üretimi için KOH alkali ön işleminin daha önemli olduğunu vurgulayan başka bir çalışmada mısır koçanının %13 KOH dozunda %5'lik katı oranında 72 saat boyunca fermentasyon işleminin sonucunda %90 oranında toplam şeker üretimini gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir. Ayrıca bazı biyo kütlelerin (bambu, kauçuk ve çim) biyo yakıt üretiminde kullanımı ve şeker dönüşüm potansiyelleri düşüktür. Bu biyokütlelerden biri olan çimlerin KOH ön işlemi ile 100 gr hammaddenin 121 °C'de 1 saat fermentasyon süresinde 19 g şeker üretiminin olduğunu ve enerji potansiyelini arttırmaktadır [19]. Çoğu ön işlem geleneksel ısıtma yöntemi ile yapılmaktadır. Çim

biyokütlesinin mikrodalga destekli alkali ön işleminde 100 gr hammadde de 34,5 gr toplam şeker kazanımı olduğu belirtilmiştir [20]. Buğday samanı biyokütlesinin KOH ön işleminde kombinasyon çalışması yaparak sadece KOH ön işlemine kıyasla %80 şeker üretimini arttırmışlardır [21]. Yapılan araştırmalarda potasyum hidroksit gibi alkali tuzların seçimi sürdürülebilirliği değerlendirildiğinde fermentasyon sonrası fermente sıvılarının bitkilerde gübre olarak kullanımı etkin bir geri kazanım ve temiz üretim sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal ve Metot

Meyve suyu fabrikalarından tarımsal endüstriyel olarak çıkan elma posaları Niğde'de yerel bir meyve suyu fabrikasından temin edilmiştir. İlk adımda elma posaları 50 °C'de 48 saat kurutulmuştur ve ardından İKA MF10 öğütücü ile 1,0, 0,6 ve 0,2 ağ elek içinden geçmek üzere öğütülmüştür. Parçacık boyutunu tanımlarken alt ve üst elek açıklıkları kullanılmıştır. Tüm deneyler 250 ml'lik roch şişelerinde gerçekleştirildi. Tüm numuneler, analiz için 0,25 µm membran filtre ile süzülme ve 10 dakika süreyle 10,000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Elde edilen süpernatantlarda toplam şeker ve indirgeme şeker analizleri yapılmıştır.

3.2. Ön İşlem Yöntemi

İki farklı koşul altında alkali ön işlem uygulandı. Ön işlem sıcaklığa dayanıklı borosilikat roch şişelerinde 1 atm basınç altında 100°C (basınçsız) ve ısıya dayanıklı borosilikat roch şişelerinde otoklavda 1,2 atm basınç altında 121°C'de (basınçlı) potasyum hidroksit alkali asit ile gerçekleştirilmiştir. Optimum reaksiyon koşullarını elde etmek için kimyasal miktarı, katı miktarı ve zaman parametreleri Box-Behnken yanıt yüzey metodolojisine göre optimize edilmiştir.

3.3. İstatiksel Yöntem

Deneyler sırasında minimum kimyasal kullanımı ve etkili zaman yönetimi için çoklu faktörlerin optimizasyonu için istatiksel yöntem olan yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. RSM ile optimum bir sonuç elde edebilmek için deney desenleri kullanılmaktadır. RSM istatiksel yönteminde farklı deneysel tasarımlar bulunmaktadır. RSM istatiksel yöntemlerden biri olan Box-Behnken istatiksel deney tasarımı 3 bağımsız faktörün tepki fonksiyonları üzerindeki etkileri belirlemek için toplam şeker oranını arttırmak ve KOH kullanımını ve enerji tüketimini minimize etmek için en uygun şartları belirlemek için kullanılmıştır. Box-Behnken deneysel tasarımları faktör kombinasyonlarının değişken uzay kenarlarının orta noktalarında ve merkezde olduğu gömülü faktöriyel veya kesirli faktöriyel noktaları olmayan bağımsız ikinci dereceden bir tasarımıdır. Tarımsal endüstriyel atıkların ön işlem çalışmalarında seçilen faktörler, atığın selülozik yapısının bozulma oranını belirlemek ve ayrıca ön işlem deneyleri sırasında aşırı kimyasal kullanımını önlemek için çok önemlidir. Box-Behnken deneysel tasarımı, birinci ve ikinci derece katsayıların verimli bir şekilde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Elma posası atığına çeşitli faktörler ile ön işlem uygulanmıştır.

Box-Behnken deney tasarımı, tüm farklı ön işlemler için optimum koşulları bulmak için kullanılmıştır. Box-Behnken deneysel tasarımı için istatistiksel bir model oluşturmak için Design Expert 7.0.0 deneme sürümü yazılımı kullanılmıştır. Bu deneysel tasarım için üç farklı faktör ve 3 seviye kullanılmıştır.

3.4. Analiz

Elma posası süpernatantları, 3,5-dinitrosalisilik asit reaktif kullanılarak DNS yöntemine dayalı olarak toplam indirgeme şekerinin konsantrasyonunu belirlemek için kullanıldı. 3 ml hazırlanan numune, 3 ml DNS ile karıştırıldı ve vorteks ile homojen hale getirilmiştir. Daha sonra

örnekler buz ile soğutulmuş ve ardından 575 nm’de spektrometrik ölçüm ile yapılmıştır [22]. Toplam şeker konsantrasyonu fenol-sülfürik asit yöntemi ile ölçülmüştür. 0,5 ml numuneye 0,5 ml %5 fenol solüsyonu ilave edilerek ardından vorteks ile homojenize edildi. 2,5 ml %98’lik H₂SO₄ karışıma ilave edildi ve daha sonra tekrar karıştırılmıştır. Spektrofotometrik ölçüm 30 dakika sonra 488 nm dalga boyunda yapılmıştır [23].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Box-Behnken Modeli Yüzey Yanıtları

Türkiye’de tarımsal üretim açısından zengin bölgelerden biri İç Anadolu Bölgesidir. Bu bölgede yer alan Niğde ilinde 1100 hektar tarım arazisinde yaklaşık 19.000 ton elma üretilmektedir. Bölgede hem sanayi hem de tarımsal üretim söz konusu olduğundan gelen tarımsal sanayi atıkları arasında elma önemli bir yer tutmaktadır.

Gıda endüstrisinde geniş bir yelpazeye sahip olan meyve suyu fabrikalarının üretim sonrasında ciddi miktarlarda atık oluşmaktadır. Bu atıkların bertarafında zorluklar mevcuttur. Biyo kütle olarak bu meyve suyu fabrikası atıkları önemli biyo-enerji değerine sahiptir ve ucuz hammadde kaynağıdır. Agro-endüstriyel atıklardan yakıt üretimi temiz enerji üretimi, iklim değişikliğine katkısı ve atıkların kaynağında yönetimi bakımından üç noktada ele alınmalıdır. Bu bağlamda elma posası atıklarının biyo yakıt verimini arttırmak için potasyum hidroksit ile alkali ön işlem uygulanmıştır.

KOH alkali önışlemin optimizasyonu ile belirlenmesinde Box-Behnken istatistiksel modeli seçilmiştir. Basınçlı ve basınçsız ortamlar da KOH ön işlemin için; kimyasal oranı, zaman ve elma posası katı oranı faktörler belirlenerek düşük (-1), orta (O) ve maksimum (+1) seviyeler olarak belirtilmiştir. İstatistiksel değerler Çizelge 1’de verilmiştir. Bu yanıtlar Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4 de 3 boyutlu grafiklerle ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 1. Elma posaları KOH konsantrasyonu, zaman ve katı oranı için Box-Behnken deneysel dizayn ve yanıtlar

Deney no	KOH konsantrasyonu (%)	Zaman (dk)	Katı oranı (%)	1,2 Atm 100°C		1 Atm 121°C	
				Toplam şeker (g/L)	İndirgenmiş şeker (g/L)	Toplam şeker (g/L)	İndirgenmiş şeker (g/L)
1	5,00	30	5,00	9,42	5,88	15,22	5,23
2	3,00	60	5,00	9,68	5,31	18,70	8,73
3	1,00	60	7,50	13,12	7,83	4,64	2,96
4	1,00	30	5,00	5,21	3,21	12,94	4,83
5	3,00	60	5,00	9,03	5,80	16,21	8,41
6	3,00	90	7,50	11,43	6,42	14,62	5,68
7	5,00	90	5,00	11,37	6,46	22,35	10,69
8	3,00	30	2,50	8,53	5,71	7,88	5,82
9	3,00	60	5,00	9,41	5,03	17,19	7,89
10	3,00	60	5,00	9,07	5,34	16,93	7,34
11	3,00	30	7,50	9,70	5,14	6,03	5,01
12	3,00	90	2,50	14,17	6,58	4,12	2,33
13	1,00	60	2,50	4,80	2,47	4,68	2,89
14	5,00	60	2,50	10,28	6,20	4,96	2,88
15	1,00	90	5,00	7,39	4,14	5,92	2,78
16	5,00	60	7,50	16,57	8,92	16,27	8,98

Elma posalarının biyoyakıt potansiyelini arttırmak için basınçlı ve basınçsız ortamda alkali ön işlem etkisi incelenerek toplam şeker ve indirgenmiş şeker konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu değerler atığın biyoenerji potansiyelini ve bu potansiyelin ne kadar önışlem ile artacağını beklenmektedir. Basınçsız 100°C’de yürütülen toplam şeker optimizasyon çalışmasına göre belirlenen Box Behnken modeline göre; 156,44 Model F değeri ve R^2 değerinin **0,99** olması modelin önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca 0,0500’den küçük “Prob>F” değerleri de model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterirken; A, B, AB, AC, BC, A^2 , C^2 , A^2C önemli model terimleridir. Kodlanmış faktörler açısından son denklem ikinci dereceden olup (Eşitlik 1);

$$\begin{aligned} 1/\text{Toplam Şeker} = & +0,11-0,032*A-0,016*B \\ & +,231E-004*C+ 9,530E-003*A*B+ \\ & 0,024*A*C+7,752E-003*B*C+ 0.019*A^2 \\ & +3,346E-003*B^2-0,016*C^2-3,106E- \\ & 003*A^2*B-0,043*A^2*C-1,484E-003*A*B^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Basınçsız 100 °C’de yürütülen toplam şeker optimizasyon çalışmasına göre belirlenen Box Behnken modeline göre; 55,06 F değeri ve R^2 değerinin **99,5** bulunması modelin doğruluğunu gösterir. Ayrıca 0,0500’den küçük “Prob>F”

değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, AC, A^2 , C^2 , A^2C önemli model terimler ve modelin denklemi ikinci derecedendir (Eşitlik 2).

$$\begin{aligned} 1/\text{İndirgenmiş Şeker} = & +0,19-0,064*A- \\ & 0,015*B+5,863E-03*C+0,013*A*B \\ & +0,057*A*C-3,936E-003*B*C+0,032*A^2 \\ & +4,301E-004*B^2-0,018*C^2-5,712E-003*A^2 \\ & B-0,087*A^2C+7,582E-003*AB^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Basınçlı 121 °C’de 1,2 atm basınçta yürütülen optimizasyon çalışmasına göre belirlenen Box Behnken modeline göre; 42,89 Model F değeri ve R^2 değerinin **0,99** olması, modelin önemli olduğunu gösterir. 0,0500’den küçük “Prob>F” değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, C, AB, AC, BC, A^2 , C^2 önemli model terimleri olup model denklemi ikinci derecedendir (Eşitlik 3).

$$\begin{aligned} \text{Toplam Şeker} = & +17,26+2,98*A+1,21*B \\ & +2,16*C+3,54*A*B+2,84*A*C \\ & +3,09*B*C-1,84*A^2-1,31*B^2-7,78*C^2- \\ & 1,18*A^2*B+0,65*A^2*C+1,70*A*B^2 \end{aligned} \quad (3)$$

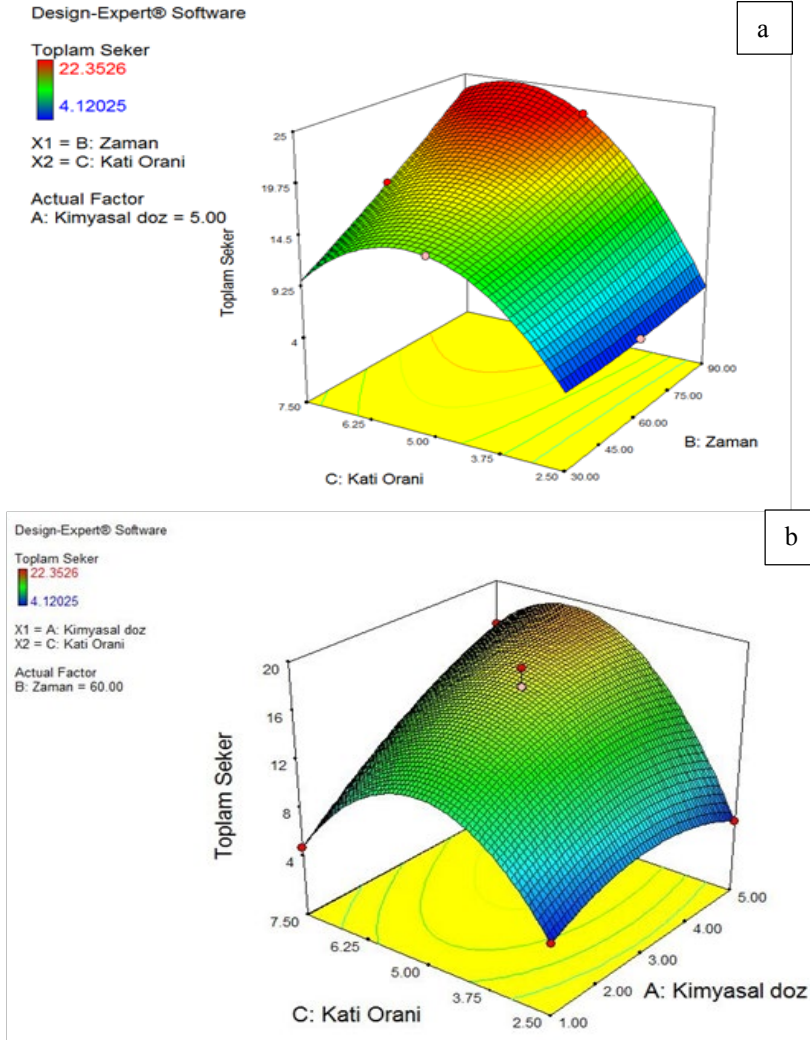
Basınçlı 121 °C’de 1,2 atm basınçta yürütülen optimizasyon çalışmasına göre belirlenen Box

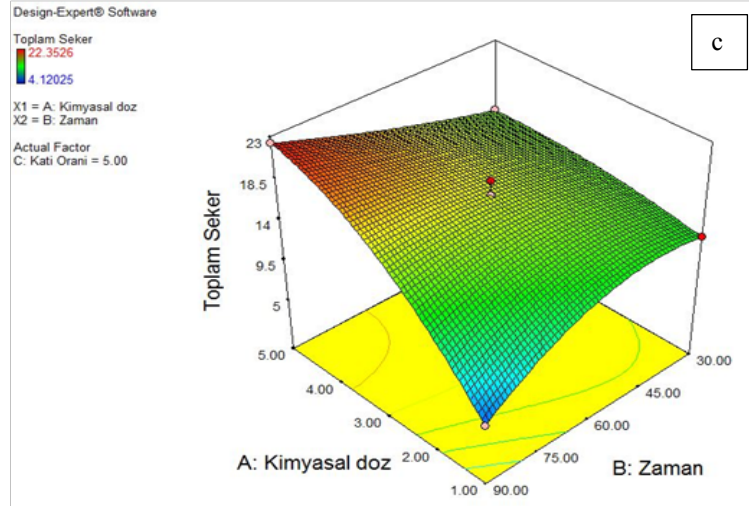
Behnken modeline göre; 23,13 F değeri ve R^2 değerinin 99,5 modelin önemli olduğunu gösterir. 0,0500'den küçük "Prob>F" değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, AB, AC, BC, A^2 , C^2 , A^2B önemli model terimleri olup, modelin denklemi ikinci derecedir (Eşitlik 4).

$$\begin{aligned} \text{İndirgenmiş Şeker} = & +8,10 + 1,50 * A - 0,70 * B + \\ & 0,63 * C + 1,88 * A * B + 1,51 * A * C + 1,04 * B * C - \\ & 1,25 * A^2 - 0,96 * B^2 - 2,42 * C^2 + 1,55 * A^2 * B \\ & + 0,91 * A^2 * C + 0,58 * A * B \end{aligned} \quad (4)$$

4.2. Basınçlı Ortamda KOH Ön İşlemi

Organik maddeler üzerinde yapılan ön işlemler, biyokütle yüzey alanını ve gözenekliliği artırarak, lignin yapılarını değiştirir ve aynı zamanda yarı selülozik bileşenleri parçalayarak selüloz kristalliğini azaltmaktadır. Bu etkiler enzimatik şekerlendirme aşamasını geliştirmektedir. Böylece fermentasyon süreçleri için geri kazanılabilen daha yüksek fermente edilebilir şekerler elde edilmektedir.

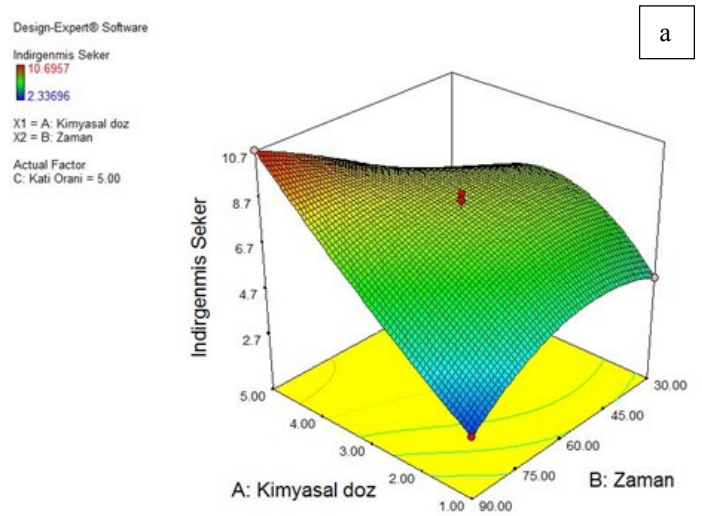


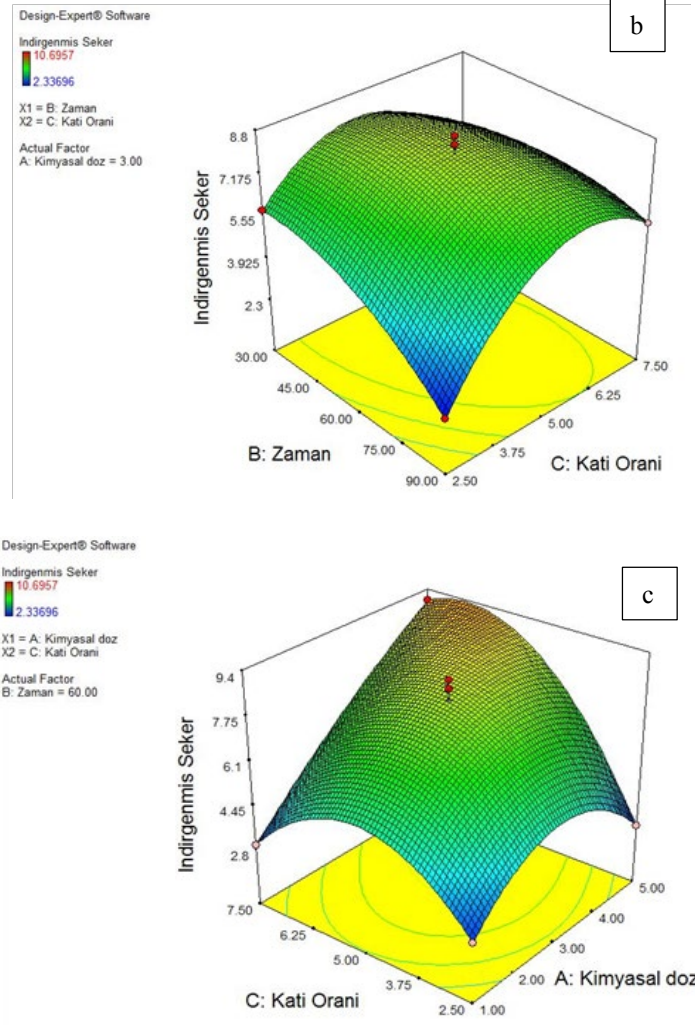


Şekil 1. KOH ön işlemleri için farklı faktörlere bağlı toplam şeker konsantrasyonu

121 °C'de 1,2 atm basınçta gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında toplam şeker ve indirgen şeker değerindeki değişimler Şekil 1'de ayrıntılı olarak grafiklendirilmiştir. Katı oran faktörünün kimyasal doz faktörü ile birlikte seviye değişimleri aynı anda değerlendirildiğinde %3'lük kimyasal dozun sabit olduğu önışlem koşulunda 1 saatlik reaksiyon süresinde %5'lik katı oranını uygulandığında 22,3 g/L optimum toplam şeker değerine ulaşılmıştır (Şekil 1a). Katı oran faktörünün kimyasal doz faktörü ile birlikte seviye değişimleri aynı anda değerlendirildiğinde 60 dakikalık önışlemden optimum katı oranı %5'de

kimyasal dozunun %3 olduğu koşulda optimum toplam şeker değeri olan 22,3 g/L'ye ulaşılmaktadır (Şekil 1b). Katı oranı faktörünün seviyesi %5 olduğu koşul sabit tutulduğunda kimyasal doz faktörünün seviyesinin artması ile daha kısa zamanda optimum toplam şeker değerine ulaşılmaktadır. Bu durum kimyasal doz seviyesinin %3 optimal koşulda 22,3 g/L toplam şeker değeri gibi yüksek sonuçlara ulaşması için optimal zaman olan 60 dakikada elde edilmesi zamanın süresinin dikkat çekici olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 1c).





Şekil 2. Basıncılı KOH ön işlemi için farklı faktörlere bağlı indirgenmiş şeker konsantrasyonu

Basıncılı ortamda KOH ile yapılan ön işlemden indirgenmiş şeker değerindeki değişim Şekil 2'de ayrıntılı olarak incelenmiştir. KOH konsantrasyonundaki değişim indirgenmiş şeker değerini artırırken zaman faktörünün seviyesinin optimum olduğu 60 dakikada maksimum değer olan 10,696 g/L indirgenmiş şeker değeri olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı olarak katı oranındaki değişimin indirgenmiş şeker değerine olan etkisi Şekil 2b'de incelendiğinde katı oran faktör seviyesinin %5 iken ve zaman faktör seviyesinin 60 dakika olduğu seviyede maksimum indirgenmiş

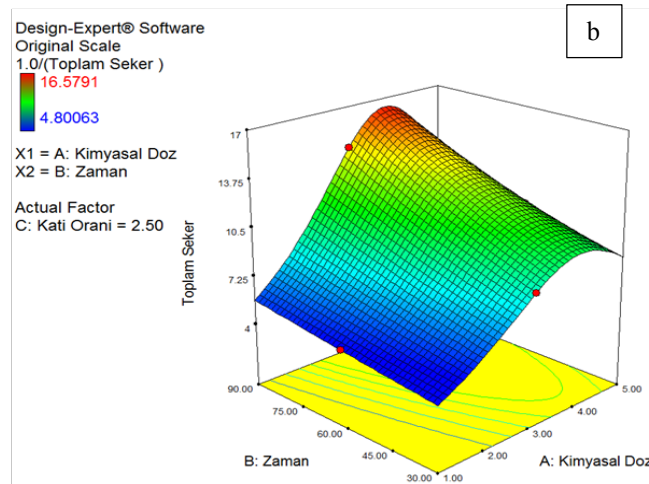
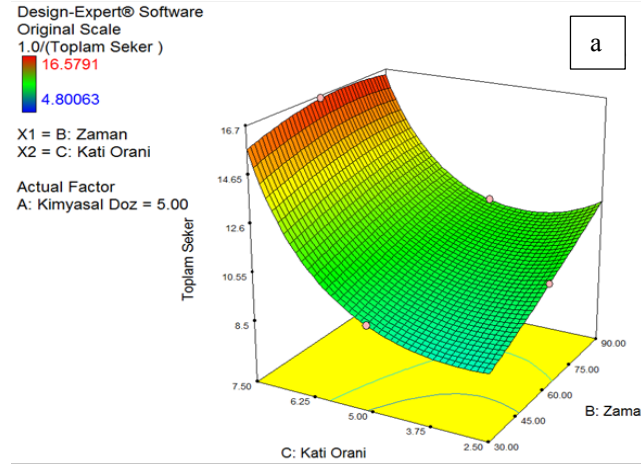
şeker değerine ulaşmıştır. Ayrıca katı oran faktör seviyesinin kimyasal doz faktör seviyesi ile birlikte değerlendirildiğinde Şekil 2c'ye göre KOH optimum konsantrasyonu ve optimum katı derişiminde maksimum değere ulaşması ve R²'nin %99 seviyesinde olması yapılan optimizasyon çalışmasının başarılı olduğunu göstermektedir.

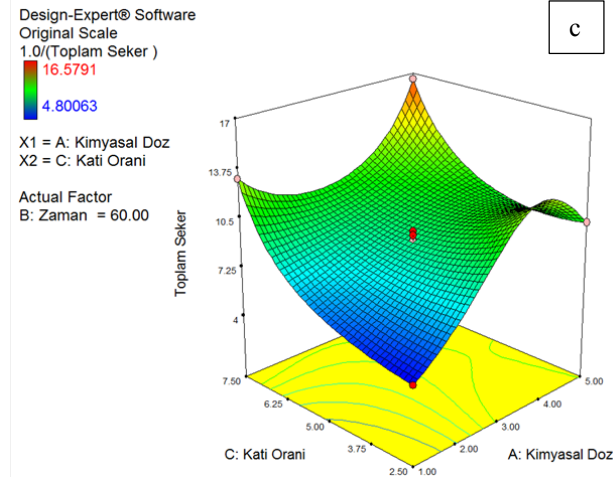
4.3. Basıncısız Ortamda KOH Ön İşlemi

100 °C'de 1 atm basıncılı ortamda yapılan reaksiyonda indirgenmiş şeker ve toplam şeker

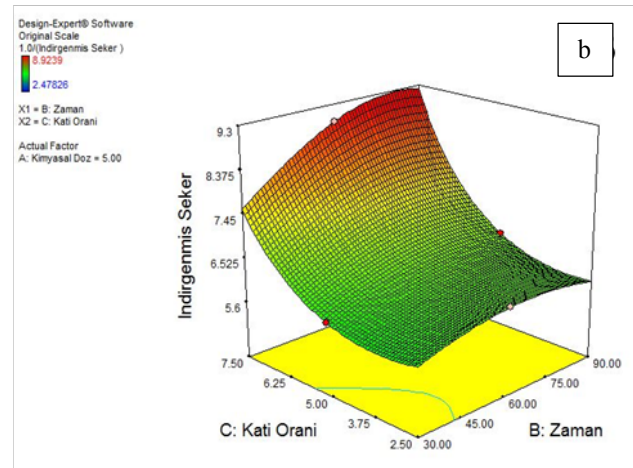
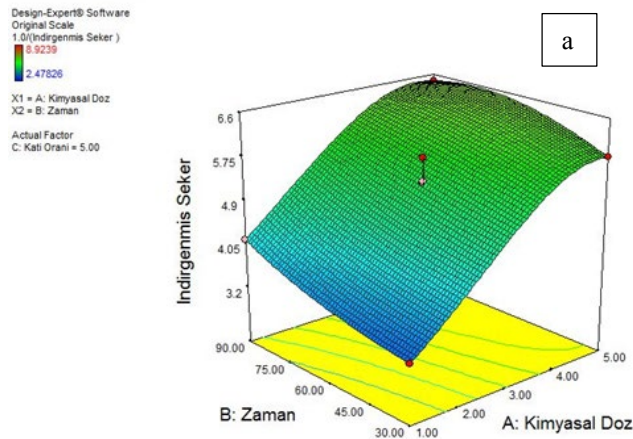
üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde katı oranı faktör seviyesi azaldıkça reaksiyon süre faktörünün seviyesinin artması ile toplam şeker değeri maksimum değer olan 16,58 g/L değerine ulaşmıştır (Şekil 3a). Bu değer basınçlı ortam ile karşılaştırıldığında daha düşük kalmaktadır. Reaksiyon süresinin uzunluğu harcanacak olan enerjiden ve zamandan dolayı istenilmeyen bir durum olması nedeniyle bu koşulda daha kısa sürede daha yüksek verim elde edilen basınçlı koşullar daha çok tercih edilmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Şekil 3b'de zaman faktörünün seviyeleri ile zaman faktörünün seviyeleri birlikte değerlendirildiğinde optimum

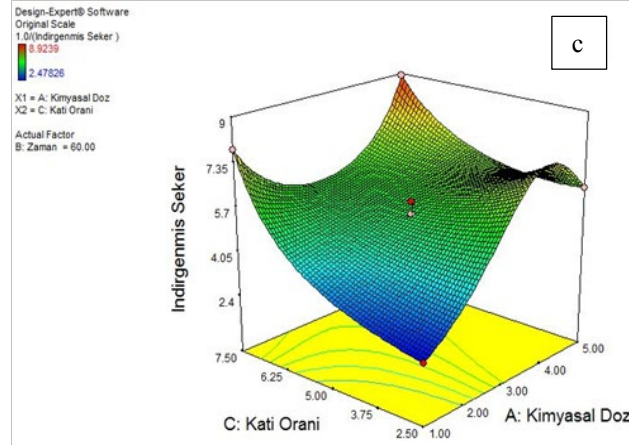
zaman olan 60 dakikada %3'lük KOH konsantrasyonunda optimum toplam şeker değeri olan 16,58'e ulaşırken kimyasal dozun artışına göre toplam şeker değerini maksimum değer olan 16,58'e ulaşmıştır. Kimyasal doz faktörünün seviyesi ile katı oranı faktörünün seviyesi birlikte değerlendirildiğinde Şekil 3C'de görüldüğü gibi kimyasal dozun maksimum değer olan %5'lik KOH konsantrasyonu ve %7,5 maksimum katı oranında maksimum toplam şeker değeri olan 16,58 g/L'ye ulaşılmıştır. Elde edilen verilerden de anlaşıldığı üzere basınçsız sistemler verimliliği ve uygulama açısından maliyetli olarak görülmektedir.





Şekil 3. Basıncsız KOH ön işlemi için farklı faktörlere bağlı toplam şeker konsantrasyonu





Şekil 4. Basınçsız KOH ön işleme için farklı faktörlere bağlı indirgenmiş şeker konsantrasyonu

Mikrobiyal aktivite açısından oldukça kıymetli olan indirgenmiş şeker değeri Basınçsız koşullar için değerlendirilmesi Şekil 4'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Toplam şeker değerine benzer şekilde zamana bağlı olarak KOH derişim etkisi incelendiğinde maksimum kimyasal doz (%5) ve 90 dakikalık maksimum zamanda 8,92 g/L maksimum indirgenmiş şeker değerine ulaşılmıştır. Zamana bağlı olarak katı oranı değerlendirildiğinde (Şekil 4b) zamanın maksimum değeri olan 90 dakika da maksimum katı oranında maksimum indirgenmiş şeker ulaşılmış ve bu değer toplam şeker reaksiyon tepkilerinde benzer faktörlerin benzer reaksiyon gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 4c Şekil 4a ve 4b ile birlikte incelendiğinde maksimum indirgenmiş şeker değerlerini elde etmek için belirlenen faktörlerin (zaman, katı oranı ve kimyasal doz) maksimum değerlerinde olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Çalışmada, elma posalarının basınçlı ve basınçsız ortamlarda ön işlem koşullarının verimliliği yanıt yüzey metodolojisi ile araştırılmıştır. Box-Behnken deney dizaynından elde edilen yanıtlar incelendiğinde basınçlı ortamın reaksiyon süresini ve tepkisinde etkili olduğu görülmektedir. Basınçlı ortamda reaksiyon süresi 60 dakikada ve %5 oranında hammadde kullanımında toplam şeker miktarının 22,36 g/L'ye ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca basınçsız ortamda daha uzun reaksiyon

süresi ve hammadde kullanımı maliyetli olması temiz teknoloji potansiyeli taşımadığını göstermektedir.

Yanıt yüzey metodolojisinde sıcaklık ve zaman faktörleri potasyum hidroksit prosesinde önemli değişkenlerdir. Çalışmaya göre potasyum hidroksit alkali ön işleminde en önemli etkinin sıcaklık ve basınç olduğu belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Aditiya, H.B., Mahlia, T.M.I., Chong, W.T., Nur, H., Sebayang, A.H., 2016. Second Generation Bioethanol Production: A Critical Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Elsevier 66, 631-653.
2. Zhang, Y.H.P., 2008. Reviving the Carbohydrate Economy via Multi-product Lignocellulose Biorefineries. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 35, 367-375.
3. Takeuchi, K., Kauffman, J.M., Komiyama, H., Van Der Leeuw, S., Yoshikawa, H., Sri, T., Hamid, Z.A., 2018. Biofuels and Sustainability. *Holistic Perspectives for Policy-making. Sci. Sustain. Soc.*
4. Deveci, E.Ü., Gönen, Ç., 2018. Comparative Analysis of Strong and Weak Acid Pretreatment Methods Under Pressurized and Non-pressurized Conditions for Agro-industrial Waste of Apple Pulp. *Energy Environ.* 29, 1038-1052.

5. Nicodème, T., Berchem, T., Jacquet, N. Richel, A., 2018. Thermochemical Conversion of Sugar Industry By-products to Biofuels. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Elsevier 88, 151-159.
6. Voloshin, R.A., Rodionova, M.V., Zharmukhamedov, S.K., Nejat Veziroglu, T., Allakhverdiev, S.I., 2016. Review: Biofuel Production from Plant and Algal Biomass. *Int. J. Hydrogen Energy*, Elsevier 41, 17257-17273.
7. Mohr, A., Raman, S., 2015. Lessons from First Generation Biofuels and Implications for the Sustainability Appraisal of Second Generation Biofuels. *Effic. Sustain. Biofuel Prod. Environ. Land-Use Res.*, Elsevier 63, 281-310.
8. Yaser, D., Kashif, S., Sarkar, B., Pallavi, R.B.M., 2019. 14-Biofuels: Their characteristics and Analysis. In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (Deepak Verma, Elena Fortunati, Siddharth Jain, X.Z., ed.), 277–325, Woodhead Publishing.
9. Basso, D., Patuzzi, F., Castello, D., Baratieri, M., Rada, E.C., Weiss-Hortala, E., Fiori, L., 2016. Agro-industrial Waste to Solid Biofuel Through Hydrothermal Carbonization. *Waste Manag.*, Elsevier 47, 114-121.
10. Hassan, S.S., Williams, G.A., Jaiswal, A.K., 2018. Emerging Technologies for the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Bioresour. Technol.*, Elsevier, 262, 310-318.
11. Jönsson, L.J., Martín, C., 2016. Pretreatment of Lignocellulose: Formation of Inhibitory by-products and Strategies for Minimizing Their Effects. *Bioresour. Technol.* 199, 103-112.
12. Kumar, A.K., Sharma, S., 2017. Recent Updates on Different Methods of Pretreatment of Lignocellulosic Feedstocks: A Review. *Bioresour. Bioprocess.* 4(1), 7. doi: 10.1186/s40643-017-0137-9.
13. Tomás-Pejó, E., Feroso, J., Herrador, E., Hernando, H., Jiménez-Sánchez, S., Ballesteros, M., González-Fernández, C., Serrano, D.P., 2017. Valorization of Steam-exploded Wheat Straw Through a Biorefinery Approach: Bioethanol and Bio-oil co-production. *Fuel* 199, 403-412.
14. Dhillon, G.S., Kaur, S., Brar, S.K., 2013. Perspective of Apple Processing Wastes as Low-cost Substrates for Bioproduction of High Value Products: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Elsevier 27, 789-805.
15. Sun, Y., Cheng, J., 2002. Hydrolysis of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production: A Review. *Bioresour. Technol.*, 83(1), 1-11.
16. Sendich, E., (Newton), Laser, M., Kim, S., Alizadeh, H., Laureano-Perez, L., Dale, B., Lynd, L., 2008. Recent Process Improvements for the Ammonia Fiber Expansion (AFEX) Process and Resulting Reductions in Minimum Ethanol Selling Price. *Bioresour. Technol.* 99, 8429-8435.
17. Persson, T., Ren, J.L., Joëlsson, E., Jönsson, A.S., 2009. Fractionation of Wheat and Barley Straw to Access High-molecular-mass Hemicelluloses Prior to Ethanol Production. *Bioresour. Technol.*, Elsevier 100, 3906-3913.
18. Júnior, A.D.N.F., Etchelet, M.I., Braga, A.F., M., Clavijo, L., Loaces, I., Noya, F., Etchebehere, C., 2020. Alkaline Pretreatment of Yerba Mate (*Ilex Paraguariensis*) Waste for Unlocking Low-cost Cellulosic Biofuel. *Fuel*, Elsevier, 266, 117068.
19. Bensah, E.C., Kádár, Z., Mensah, M.Y., 2019. Alkali and Glycerol Pretreatment of West African Biomass for Production of Sugars and Ethanol. *Bioresour. Technol. Reports* 6, 123-130.
20. Hu, Z., Wen, Z., 2008. Enhancing Enzymatic Digestibility of Switchgrass by Microwave-assisted Alkali Pretreatment. *Biochem. Eng. J.*, 38, 369-378.
21. Xie, X., Feng, X., Chi, S., Zhang, Y., Yu, G., Liu, C., Li, Z., Li, B., Peng, H. 2018. A Sustainable and Effective Potassium Hydroxide Pretreatment of Wheat Straw for the Production of Fermentable Sugars. *Bioresour. Technol. Reports*, Elsevier, 3, 169-176.
22. Miller, G.L., 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Anal. Chem.*, 31, 426-428.
23. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.*, 28, 350-356.

Kütle Spektrometresi Verileri Kullanılarak Yumurtalık Kanserinin Yapay Sinir Ağlarıyla Sınıflandırılması

Demet YEŞİLBAŞ*¹, Ayşegül GÜVEN¹

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri

Geliş tarihi: 05.03.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Kanserin fark edilme aşaması, diğer kanser türlerinde olduğu gibi iyileşme oranını etkiler. Yaşı ilerlemiş kadınlar için ciddi bir hastalık olan yumurtalık kanseri başlangıç aşamasında fark edilmez, çoğu zaman diğer hastalıklarla karıştırılır. Yüzey Güçlendirmeli Lazer Desorpsiyon/İyonizasyon Uçuş Zamanlı Kütle Spektrometresi (SELDI-TOF-MS) kompleks numunelerin incelenmesine olanak sağlayarak yumurtalık ve diğer kanser türlerinin ayırt edilmesinde potansiyel belirteçtir. Bu çalışmada, FDA-NCI web sitesinde yer alan yumurtalıklara ait iki Düşük Çözünürlüklü SELDI-TOF-MS veri setini Yapay Sinir Ağları (YSA) ile sınıflandırarak, veri setlerini karşılaştırıyoruz. Ön işleme adımı olarak, Temel Bileşenler Analizi (PCA-Principal Component Analysis) kullandık. PCA uygulanmış verinin en yüksek varyans oranına sahip 20 bileşeni seçildi, 10 nörondan oluşan tek gizli katmanlı İleri Yönlü YSA ile sınıflandırma yapıldı ve 4-3-02 isimli veri seti için %95 doğruluk elde edilirken, 8-7-02 isimli veri seti için %100 doğruluk elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağları, Temel bileşenler analizi, Yumurtalık kanseri, SELDI-TOF-MS

Classification of Ovarian Cancer with Neural Networks Using Mass Spectrometry Data

Abstract

The stage of cancer diagnosis affects the rate of recovery, as in other types of cancer. Ovarian cancer is a serious disease for older women, is not noticed at the initial stage and is often confused with other diseases. Surface-Enhanced Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (SELDI-TOF-MS) is a potential biomarker for distinguishing ovarian and other types of cancer by allowing the examination of complex samples. In this study, we classified two Low-Resolution SELDI-TOF-MS ovarian datasets from the FDA-NCI website with Artificial Neural Networks (ANN) and compared them. We used Principal Component Analysis (PCA) as a preprocessing step of classification. 20 components of maximum variance in the PCA-applied data are selected and classified with the feed-forward ANN consists of a single hidden layer with 10 neurons, 95% accuracy was achieved for the data set named 4-3-02 and 100% accuracy achieved for the data set named 8-7-02.

Keywords: Artificial neural networks, Principal components analysis, Ovarian cancer, SELDI-TOF-MS

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Demet YEŞİLBAŞ, demetyesilbass@gmail.com

1. GİRİŞ

Yumurtalık kanseri, 2020 yılı istatistiklerine göre kadınlarda görülen en yaygın sekizinci kanser türüdür [1]. Global Kanser Gözlemevi (Global Cancer Observatory)'nin dünya çapında gelecekteki kanser insidansını ve ölüm oranını tahmin eden aracı Cancer Tomorrow'a göre, mevcut 313.825 yeni vaka sayısının 2040 yılında 427.959 yeni vaka sayısına; 207.155 mortalitenin 306.929'a yükseleceği öngörülmektedir [2]. Yumurtalık kanseri genellikle menopoz sonrası dönemde ortaya çıkar. İlk aşamada fark edildiğinde gerekli tedavi ve uygulamalar ile %90'a varan iyileşme oranı gözlemlenirken, kanserin son aşamalarında bu oran, %30'un altına düşmektedir [3,4]. Tümörün gizli olarak büyümesi semptomların geç görülmesine neden olur ve hastalık ileri aşamalarda fark edilir. Bu da ölüm oranının yüksek olmasına neden olur [5]. Bu süreçte teşhis sistemlerinden elde edilen bilginin hatalı yorumlanması problemin ciddiyetini artırır.

Kötü huylu tümör ve diğer birçok hastalık, protein düzeyindeki mutasyonlar neticesinde meydana gelir [6]. Proteomik, bir hücre veya organizmanın tüm protein bileşiminin yani proteomunun faaliyetlerini incelenmesini içerir. Proteomik teknolojisindeki ilerlemeler, birçok hastalığın moleküler seviyelerde çok daha iyi anlaşılmasına imkân tanır [7]. Kanserli dokuya ait protein imzaları teşhis, hastalığın seyri ve tedaviye yanıt hakkında faydalı olabilecek bilgiler sağlar [8].

Kütle spektrometresi (Mass Spectrometry- MS), manyetik veya elektriksel alanda hareket eden yüklü parçacıkların kütle/yük (m/z) oranına bağlı olarak molekülün yapısı hakkında bilgi verilmesini sağlar. Yaygın olarak kullanılan MS sistemleri Matris ile Desteklenmiş Lazer Desorpsiyon/İyonizasyon Uçuş Zamanlı Kütle Spektrometresi (MALDI-TOF-MS) ve daha gelişmiş versiyonu olan Yüzey Güçlendirmeli Lazer Desorpsiyon/İyonizasyon Uçuş Zamanlı Kütle Spektrometresidir (Surface-Enhanced Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry-SELDI-TOF-MS) [9]. SELDI-TOF-MS, kromatografi ve kütle spektrometrisi tekniklerini birleştirir ve çeşitli biyolojik

numunelerde binlerce analitin kapsamlı bir şekilde değerlendirerek, kanserin erken tespit edilmesine imkân sağlayan bir yaklaşımdır [10]. SELDI-TOF-MS'nden bilgi nasıl elde edilir diye baktığımızda: Kromatografik ayırma işlemi uygulanarak protein seçici yüzeye tutunmuş numune, lazerle iyonize edilir ve bir vakum odasındaki ters yüklü elektrotlara doğru hareket etmesi sağlanır. Burada kütle/yük oranı (m/z) ile orantılı olan detektöre varma süresi (Time of Flight-TOF) ölçülür. Uygun yazılımlarla m/z değerine karşılık gelen veriler gösterilir [11]. Bu veriler üzerinden numunenin ayırt edilmesini sağlayan pikler üzerinden biyoinformatik araçlarla analizler yapılarak hastalıklar (yumurtalık kanseri, akciğer kanseri, prostat kanseri, meme kanseri, kolon kanseri ve karaciğer kanseri) hakkında bilgiler elde edilebilir [12].

SELDI-TOF-MS ile, x ekseninde kütle-yük oranlarının sayısını (m/z), y ekseninde göreceli yoğunluğu gösteren yüksek boyutlu bir sinyal elde edilir. Elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma çalışmaları yapılmaktadır. Bu yüksek boyutlu verinin tümünü kullanmak yerine, verileri büyük oranda temsil eden, yeni özellikler tanımlayabilen ve veri içerisindeki gürültüyü azaltan bir özellik çıkarma yöntemi uygulanarak daha hızlı bir sınıflandırma yapılabilir [13]. Bu konuda yapılmış çalışmalar, genel olarak, verinin belirgin istatistiksel özelliklerini kullanarak sınıflandırılması üzerinedir. Günümüzde sağlık alanında kullanımı artan yapay zekânın alt kümesi olan makine öğrenmesi teknikleri, bu veriler üzerinde sınıflandırma yapmak için kullanılmaktadır.

Bazı araştırma ekipleri, SELDI verisindeki piklerin protein kimliklerini potansiyel teşhis için önem teşkil ettiğini ortaya koymuşlardır. Yapılan bir çalışmada, SELDI verisindeki pikler üzerinden özellik çıkartıp Çok Katmanlı Perceptron kullanılarak %93 doğrulukla sınıflandırma yapılmıştır [14]. Hu ve arkadaşları pankreas kanserini teşhis etmek için CIPHERGEN ProteinChip yazılımı kullanarak pikleri tespit edip Yapay Sinir Ağları (YSA) ile sınıflandırmış ve 0,3 olarak belirlenen en uygun kesme değeri için doğruluğu %93,47 olarak bulmuşlardır [15]. CIPHERGEN

Protein Chip Yazılımı ile piklerin bulunmasına dayanan başka bir çalışmada Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines-SVM) ve Çapraz Doğrusal Ayırım Analizi (Diagonal Linear Discriminant Analysis-DLDA) ile yumurtalıklara ait veriler kanser ve iyi huylu tümör olarak sınıflandırılmıştır [16].

Yapılan çalışmaların bir kısmı, istatistiksel yöntemler ile özellik çıkarımı yapıp sınıflandırma algoritmasıyla hastalığın tespit edilmesine yöneliktir. Wu ve arkadaşları Olasılıksal Temel Bileşenler Analizi (Probabilistic Principal Component Analysis-PPCA) ile Yumurtalık kanseri için SELDI-TOF-MS verilerinin boyutunu azaltıp SVM ile sınıflandırarak PPCA'nin (doğruluk=%93,93), Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis-PCA) (doğruluk=%83,34)'den daha başarılı bir sonuç ortaya koyduğunu göstermişlerdir [18]. Meme kanseri için elde edilen düşük kütleli SELDI spektrumları dalgacık dönüşümü ile T²'li PCA istatistik metodlarıyla ön işlemeye tabi tutulduktan sonra yine SVM ile, kanser ve kontrol verisi %100 doğrulukta sınıflandırılmıştır [19].

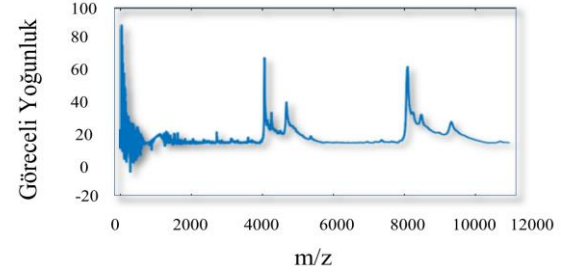
Verilerden öğrenme yoluna dayalı YSA kullanılarak yapılmış çalışmalar mevcuttur. Thakur ve arkadaşları, SELDI-TOF-MS verileri üzerinde student t-testi kullanarak özellik seçimi ve İleri Beslemeli Sinir Ağları kullanarak sınıflandırma yapmışlardır. Kontrol verisi için %98,50, kanser verisi için %99,16 test doğruluğu elde etmişlerdir [20]. SELDI-TOF-MS verileri kullanılarak yumurtalık kanserini teşhis etmek için YSA ile %98 doğruluk elde edilen bir çalışma mevcuttur [21]. Pei ve arkadaşları Yüksek Çözünürlüklü SELDI-TOF setleri için yumurtalık kanseri ve yüksek risk kontrol verisini sınıflandırmak için anahtar özelliklerin seçilmesi (rank features), PCA ve sinir ağları nöron sayısının optimizasyonu ile %100 doğruluk elde etmişlerdir [22]. Rahman ve arkadaşları, Toguchi yöntemini kullanarak optimum nöron sayısını belirlemişler ve 15 gizli nörondan oluşan bu YSA modeli %98,7 doğrulukla diğer sınıflandırma algoritmalarından (Fine Tree, SVM, K-En Yakın Komşuluk, Ensemble) daha yüksek bir performans göstermiştir [23].

Önerilen çalışmada, literatürde yapılan çalışmalarda YSA ile elde edilen başarının yüksek olması sebebiyle YSA kullanılmıştır. FDA-NCI web sitesindeki SELDI-TOF-MS tabanlı protein görüntüleme tekniği ile elde edilmiş veri setleri PCA ile 20 temel bileşene indirgenip sınıflandırılarak veri setleri arasındaki başarı kıyaslanmıştır.

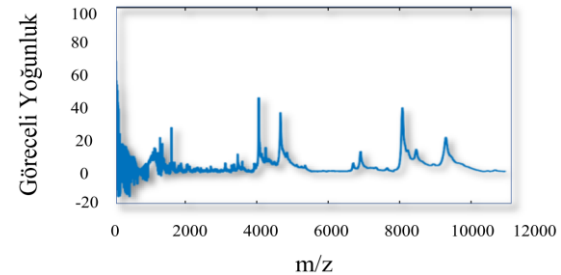
3. MATERYAL VE METOT

3.1. SELDI-TOF-MS Verileri

Çalışmada FDA-NCI web sitesinde bulunan Düşük Çözünürlüklü SELDI-TOF Veri Kümeleri kullanılmıştır. Bu düşük çözünürlüklü veri setleri elle işlenmiş 4-3-02 yumurtalık çalışması seti ve robotik şekilde işlemenin spektral kalite üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla oluşturulmuş 8-7-02 çalışma setleridir. Her iki veri seti 15154 boyutludur. Yapılan çalışmada 4-3-02 verisinin 100 kontrol 100 kanser örneği kullanılmıştır. 8-7-02 çalışma seti ise 91 normal, 162 kanserden oluşmaktadır [24]. 4-3-02 veri setine ait kanserli ve kontrol verisi örnek grafikleri Şekil-1,2'de görülmektedir. Grafiğin y eksenini göreceli yoğunluğu, x eksenini m/z değerini ifade etmektedir.



Şekil 1. 4-3-02 veri seti için kontrol verisi örneği



Şekil 2. 4-3-02 veri seti için kanser verisi örneği

3.2. Temel Bileşenler Analizi

Büyük boyutlu veriler üzerinde örüntü tanıma veya sınıflandırma algoritmalarını uygularken bilgisayarın işlem yükünü azaltmak için öncelikli olarak yapılması gereken boyut azaltma tekniklerinin kullanılmasıdır.

PCA, büyük boyutlu verileri temel özelliklerini yakalayarak daha az boyutlu temsil edilmesini sağlayan istatistiksel bir metottur [25].

PCA uygulanırken yapılan işlemler beş adımda gösterilebilir [26]:

1. Ortalamaları Hesaplama: Verinin ortalamaları alınır (Eşitlik 1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

2. Ortalamadan Çıkarma: Veri setlerinin her bir boyutu kendi ortalamalarından çıkarılır (Eşitlik 2). Çalışmamızda elde edilen yeni B verileri 15154x200 ve 15154x253 boyutundadır.

$$B = x - \bar{x} \quad (2)$$

3. Kovaryans Matris: İki değişkenin birlikte ne kadar değiştiklerinin ölçüsü olan 200x200 ve 253x253 boyutunda C kovaryans matrisleri hesaplanır (Eşitlik 3).

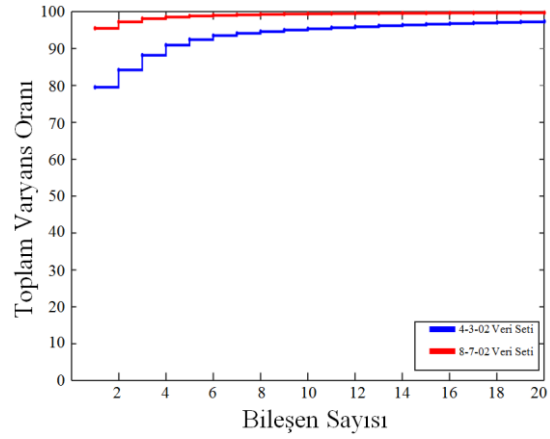
$$C = \frac{1}{n-1} B^* B \quad (3)$$

4. Öz değerler ve Özvektörler: C matrisi ile çarpıldığında yönü değişmeden kalan vektörlere denir ve Eşitlik 4'teki gibi gösterilir. Öz vektörleri hesaplayabilmek için matris formunun karesel olması gerekir bu sebeple kovaryans matris hale getirilerek işlem gerçekleştirilir.

$$CV = VD \quad (4)$$

5. Bileşenlerin Seçilmesi ve Özellik Vektörünün Oluşturulması: Bu aşamada veri setini en iyi temsil edecek bileşenler seçilir. Neticede elde

edilecek veri seti orijinal veri setinden daha az boyuta indirgenmiş olur. Şekil 3'te PCA uygulanmış veri setlerinin ilk 20 bileşenin varyans oranı görülmektedir. Mavi renkle gösterilen 4-3-02 veri seti için en yüksek varyansa sahip ilk 20 temel bileşenin tüm bileşenlere oranı %97,7 iken aynı şekil üzerinde kırmızı çizgi ile ifade edilen 8-7-02 veri seti için 99,8'dir.



Şekil 3. Veri setleri için ilk 20 bileşenin varyans oranı

3.3. Yapay Sinir Ağları

YSA, insan nöronlarının öğrenme yeteneğinin matematiksel olarak modellenmesiyle oluşturulmuş bir algoritmadır. YSA mimarisi, bünyesinde bulundurduğu yapay sinir hücrelerinin katmanlar halinde paralel şekilde bir araya gelerek bağlanmasıyla oluşturulur ve problemin türüne göre farklı katmanlardan oluşan yapı kullanılır. YSA'da hücreler ağırlık değerleri ile birbirlerine bağlıdır. Giriş katmanına verilen değerler bağlantı ağırlıkları ile çarpılıp gizli katmana iletilir (Şekil 4). Gizli katman sayısı ve bu katmanlardaki nöron sayısı problemin türüne göre deneme yanılma yoluyla belirlenir. Gizli katmanındaki bilgi işlenerek çıktı katmanına gönderilir [27].

Deneyler için MATLAB R2020b versiyonu kullanılmıştır. Oluşturulan YSA modelindeki ara katmandaki nöron sayısını saptamak için veriyi en çok temsil eden 20 girişli yapı kullanılmıştır.

Nöron sayısı 1'den 25'e kadar denenmiş ve 10 nöron olarak saptanmıştır.

Girdilere uygun çıktıları elde etmek için ağırlık değerlerinin iyi belirlenmesi gerekir. Ağın öğrenme fonksiyonunu gerçekleştirmesi doğru ağırlıkların bulunması işlemi ile mümkündür. T_i olması istenen çıkış, O_i gerçek çıktı, α öğrenme oranı ve x_j ise j. ağ girdisi olmak üzere ağırlık değişiminin hesaplanması Eşitlik 5'te görülmektedir [26,28].

$$\Delta w_{ij}^k = \alpha (T_i^k - O_i^k) x_j^k \quad (5)$$

Herhangi bir k. katmandaki örnek çifti için toplam hata ve ortalama hata fonksiyonu (Eşitlik 6,7) verilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_k - O_k)^2 \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{2p} \sum_p \sum_j (T_j - O_j)^2 \quad (7)$$

Önerdiğimiz çalışmada, giriş katmanından çıkış katmanına tek yönlü bilgi iletimi yapılmasına dayanan İleri Yönlü Yapay Sinir Ağı Modeli kullanılmıştır.

Geliştirilen YSA modelinde en başarılı öğrenme metodunu Scaled Conjugate Gradient (SCG) geri yayılım algoritması olduğu belirlenmiştir. SCG, Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasından bilinen model güven bölgesi yaklaşımını Conjugate Gradient (CG) ile kombine ederek oluşturulur. Bu yöntemde adım boyutunu tahmin etmede satır arama tekniği yerine tasarım parametreleri, her yineleme kullanıcısından bağımsız olarak güncellenir. Eşitlik 8'de görüldüğü üzere s Hesse matrisi yaklaşımı, E toplam hata fonksiyonudur. E' , E nin gradyanıdır. λ_k ve σ_k ölçekleme faktörleridir.

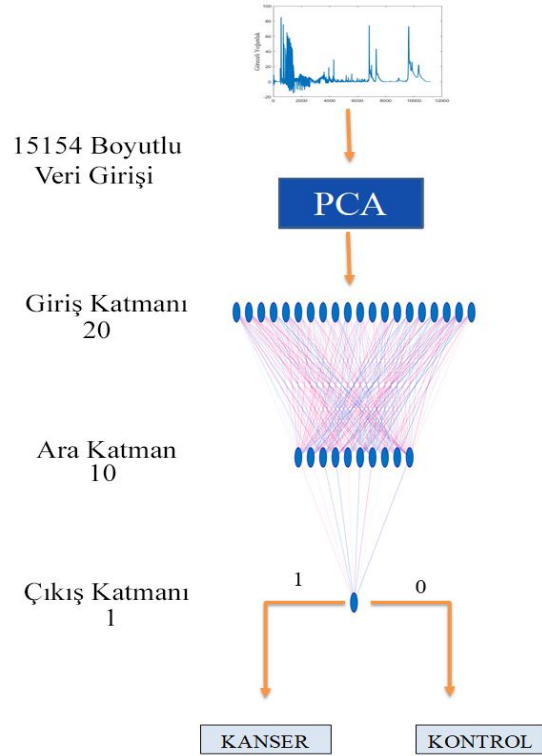
$$s_k = \frac{E'(w_k + \sigma_k p_k) - E'(w_k)}{\sigma_k} + \lambda_k p_k \quad (8)$$

SCG Algoritması dışında diğer öğrenme algoritmaları (BP, LM, CG gibi) ile de deneyler

yapılmıştır. Çalışmada kullanılan algoritma, başarı oranı daha yüksek olduğu için SCG kullanılmıştır.

Neticede oluşturulan YSA mimarisi;

- * 20 boyutlu elemanın verildiği giriş katmanı,
- * Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid transfer function) transfer fonksiyonu kullanılarak oluşturulan 10 nöronlu gizli katman,
- * Kontrol (0) ve kanser (1) olmak üzere bir ve sıfırdan oluşan tek nöronlu çıktı katmanı şeklindedir.



Şekil 4. Önerilen model

4. SONUÇLAR

YSA oluşturulması 10 tekrarlı çapraz doğrulama ile 200 örnekten oluşan 4-3-02 verisi, 180'i eğitim ve 20'si test olarak ayrılmıştır. Bu şartlar altında, giriş katmanı için 4 bileşenden 20 bileşene kadar

sınıflandırma yapılmıştır ve 20. bileşende en yüksek sınıflandırma yüzdesine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bileşen sayısı ve doğruluk yüzdeleri gösteren Çizelge-1'de yer almaktadır. 20 bileşen ile ağ eğitildiğinde elde edilen doğruluk eğitim için %99,4'e, test için %95'e eşittir.

Çizelge 1. 4-3-02 veri seti için eğitim ve test doğruluğunun seçilen bileşen sayısı ile değişimi

Bileşen sayısı	Eğitim doğruluğu (%)	Test doğruluğu (%)
4	70,0	80,0
5	78,9	80,0
6	92,2	80,0
8	90,6	90,0
10	91,7	90,0
12	96,7	70,0
14	93,3	90,0
16	97,2	90,0
18	98,9	85,0
20	99,4	95,0

Aynı deneyler 91 kontrol ve 162 kanser verisinden oluşan 8-7-02 veri seti için yapılmıştır ve 10 tekrarlı çapraz doğrulama ile 228'i eğitim 25 test olarak şekilde ayrılmıştır ve sonuçlar Çizelge 2'de görülmektedir. 20 bileşen ile ağ eğitildiğinde elde edilen doğruluk eğitim için %96,4'e, test için %100'e eşittir.

Çizelge 2. 8-7-02 veri seti için eğitim ve test doğruluğunun seçilen bileşen sayısı ile değişimi

Bileşen Sayısı	Eğitim doğruluğu (%)	Test doğruluğu (%)
4	91,1	95,0
5	93,3	85,0
6	99,4	85,0
8	96,1	95,0
10	94,4	95,0
12	98,3	85,0
14	95,6	85,0
16	99,4	90,0
18	95,0	100
20	96,4	100

Bu veri setinin gruplarındaki örnek sayısı eşit olmadığı için 91 normal verinin tamamı ve rastgele olarak 162 kanser verisinden 91 veriyi alarak yeniden sınıflandırma yaptığımızda 20 bileşen için yine %100 doğruluk elde edilmiştir.

PCA uygulanmadan 15154 boyutlu veri setleri sınıflandırıldığında elde edilen eğitim ve test doğruluğu Çizelge 3'te görülmektedir.

Çizelge 3. Verinin tamamı kullanılarak elde edilen eğitim ve test doğruluğu

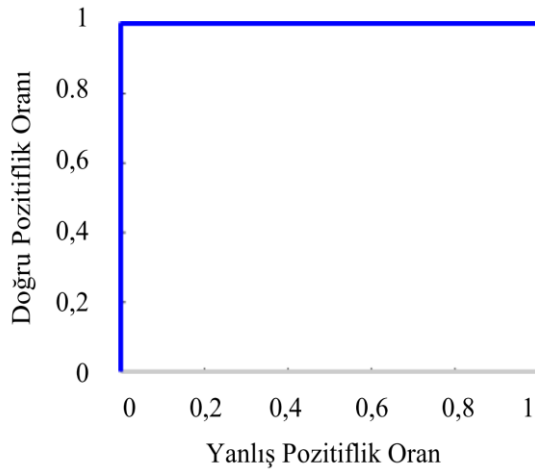
Veri Seti	Eğitim doğruluğu (%)	Test doğruluğu (%)
4-3-02	98,9	95,0
8-7-02	100	100

Oluşturulan YSA modelinin performans değerlendirmesi yapılmasına olanak sağlayan yüzde hata ve sınıflandırılmayan örnek oranını gösteren hata (confusion) matrisleri aşağıda verilmiştir. Matrislerdeki yeşil kareler doğru yüzdeyi, kırmızı kareler doğru olmayan yüzdeyi, koyu gri alan tüm doğruluğu ifade eder. '1' olarak gösterilen grup kanser verisini '0' olarak gösterilen grup kontrol grubunu göstermektedir. 20 temel bileşen ile ifade edilen, 4-3-02 veri seti için eğitim hata matrisi Çizelge 4'te görülmektedir.

Çizelge 4. 4-3-02 veri seti için eğitim hata matrisi

Gerçek Sınıf	1	86 47,8%	1 0,6%	98,9% 1,1%
	0	0 0,0%	93 51,7%	100% 0,0%
		100% 0,0%	98,9% 1,1%	99,4% 0,6%
		0	1	Hedef Sınıf

Alıcı Çalışma Karakteristikleri (Receiver Operating Characteristic-ROC) sınıflandırma modelinin performansı hakkında bilgi verir. ROC eğrisinin altında kalan alanın (Area Under the Curve- AUC) mümkün olduğunda yüksek olması istenir. Şekil 5'te oluşturulan YSA için elde edilen ROC eğrilerinden ağır başarılı bir eğitim gerçekleştirildiği görülmektedir.



Şekil 5. 4-3-02 veri seti için ROC eğrisi

4-3-02 veri setinin 20 temel bileşeni için elde edilen test hata matrisi Çizelge 5'te görülmektedir. Test sonucunda %95 doğruluk elde edilmiştir.

Çizelge 5. 4-3-02 veri seti için test hata matrisi

Gerçek Sınıf	1	13 65,0%	0 0,0%	100% 0,0%
	0	1 5,0%	6 30 %	85,7% 14,3%
		92,9% 7,1%	100% 0,0%	95% 5,0%
		0	1	
		Hedef Sınıf		

5. TARTIŞMA

SELDI-TOF-MS yumurtalık kanserinin erken tanısı için etkili bir metottur. Elde edilen verinin yüksek boyutlu olması dezavantaj olsa da PCA gibi ön işleme adımlarıyla bu sorunun üstesinden gelinebilir. SELDI-TOF-MS üzerinde çalışmaya devam edilen bir yöntemdir ve kanser için gelecekte potansiyel teşhis aracı olması beklenmektedir [11]. Bu teknikte elde edilen verilerin hatasız yorumlanması kritik önem taşır.

Sinir ağları ve diğer sınıflandırma algoritmaları kullanılarak çeşitli kanser türlerini sınıflandırmaya yönelik çalışmalar mevcuttur ve yüksek doğruluk elde edilmiştir. Bu çalışmalar mevcut sınıflandırma algoritmalarının SELDI-TOF-MS verilerini gruplandırmadaki başarısını göz önüne koymaktadır. Literatürde SELDI-TOF-MS verileri kullanılarak YSA ile kanser tespit edilmesine yönelik çalışmalar Çizelge 6'da görülmektedir. Yapılan bir çalışmada, YSA ile yumurtalık kanserini tespit etmek için ön işleme adımı olarak Rank Özellikleri ve PCA kullanılmış, verinin boyutu 15000'den 66'ya indirgenmiş ve optimize edilerek 7 nöron ile yüksek çözünürlüklü yumurtalık kanseri verisi %100 doğrulukta sınıflandırılmıştır [22]. Yumurtalık kanseri verilerinin tespit ederek ve student t-test uygulayarak sınıflandıran çalışmalar da mevcuttur. Araştırmacılar bu çalışmalarla yüksek boyutlu SELDI-TOF-MS verisinin boyutunun küçülterek ağır işlem yükünü azaltılmasına katkı sağlamışlardır [20].

Ön işlemeye tabi tutulmadan yumurtalık kanserinin sınıflandırıldığı çalışmalar için de yüksek doğruluk elde edilmiştir [21,23].

Literatürdeki YSA ile yapılmış çalışmalar Yüksek Çözünürlüklü SELDI-TOF-MS verilerine odaklanmışlardır. Düşük çözünürlüklü SELDI-TOF-MS kullanılarak yapılan çalışmada verinin tamamı kullanılarak 15154 giriş katmanı, 15 nörondan oluşan gizli katman ve 2 çıkışlı bir ağ yapısı oluşturmuşlardır [23]. Bu çalışmada kullanılan örnek sayısından yola çıkarak 8-7-02 veri seti olduğu anlaşılmaktadır bu veri seti ile elde ettiğimiz doğruluk oranı PCA kullanılarak veya kullanılmayarak daha yüksektir.

Çizelge 6. Yumurtalık kanseri için SELDI-TOF-MS verilerinin YSA ile Sınıflandırılması üzerine yapılmış çalışmalar

Veri	Yöntem	Doğruluk
[20] FDA-NCI Yüksek çözünürlüklü 95 kontrol 121 kanser	1. Student t-testi 2. İleri beslemeli sinir ağları	Kanser: %98,50 Kontrol: %99,16
[21] FDA-NCI Bilgi verilmemiştir	1. İleri Beslemeli Sinir Ağları	%98
[22] FDA-NCI Yüksek çözünürlüklü 95 normal 121 kanser	1. Rank özellikleri 2. PCA 3. Nöron optimizasyonu 4. İleri beslemeli sinir ağları	%100
[23] NCI PBSII Data Düşük çözünürlüklü 91 normal 162 kanser	1. Optimum nöron sayısı için Taguchi 2. Yapay sinir ağları	%98,7

Çalışmamızda, mevcut çalışmalardan farklı olarak, yumurtalık kanserinin sınıflandırılma başarısına, SELDI-TOF-MS verilerinin elde edilmiş biçiminin etkisini inceledik. Çizelge 7’de iki veri seti için 15154 boyutlu verinin tamamı ve 20 temel bileşen kullanılarak ağın eğitilmesi sonucu elde edilen doğruluk yüzdeleri görülmektedir.

Verilerin alındığı örneklerin farklı olduğunu belirterek, robot kolla hazırlanmış 8-7-02 çalışma seti manuel oluşturulmuş 4-3-02 çalışma setine göre daha yüksek başarıyla sınıflandırılmıştır. Bu iki veri setinin deney süreçlerindeki değişikliklerin sınıflandırma başarısına etkisini göstermektedir.

Çizelge 7. 4-3-02 ve 8-7-02 veri setleri için ağın doğruluk yüzdesi

YSA giriş katmanı		Eğitim (%)	Test (%)
4-3-02 Veri seti	PCA uygulanmış	99,4	95,0
	Verinin tamamı	98,9	95,0
8-7-02 Veri seti	PCA uygulanmış	99,6	100
	Verinin tamamı	100	100

Ağın işlem yükünü azaltmak için veri setleri PCA ile ön işlemeye tabi tutulmuştur. Düşük çözünürlüklü veriler için %70’ten yüksek sınıflandırma başarısı elde etmek için ilk 4 temel bileşen ile sınıflandırma yapılmasının yeterli olduğu görülmektedir (Çizelge 1 ve Çizelge 2).

PCA işlem yükünü azaltarak ağın hızlanmasını sağlamıştır Aynı şartlar altında 15154 boyutlu veri için eğitim süresi 21 saniye sürerken 20 temel bileşen ile 2,7 saniyeye düşürülerek daha hızlı bir sistem oluşturulmuştur (Çizelge 8).

Ek olarak, 4-3-02 veri setinin tamamı kullanılarak eğitilen ağın başarısı %95’e eşittir. Yani PCA kullanarak oluşturulan veri ile yapılan sınıflandırmanın başarısı verinin tamamı kullanılarak yapılan sınıflandırmanın başarısına eşittir. Aynı durum 8-7-02 veri seti için de geçerlidir 15 saniye süren işlem PCA ile 2,8 saniyeye düşürülüp her iki durum için %100 başarı elde edilmiştir. Bu da kullanılan PCA bileşenlerinin, daha az boyutla veriyi temsil ederek başarılı bir sonuç elde ettiğini göstermektedir.

Çizelge 8. PCA uygulandığında ve uygulanmadığında geçen süre

	PCA uygulanmış	PCA uygulanmamış
4-3-02	2,74 s	21,76 s
8-7-02	2,83 s	15,09 s

Ayrıca PCA uygulanmadan sınıflandırma yapıldığında 8-7-02 veri seti içerdiği örnek sayısı 53 tane daha fazla olmasına rağmen sınıflandırılması için gerekli olan sürenin daha kısa olduğu görülmektedir. Böyle bir sonuç elde edilmesi verinin robotik şekilde elde edilmesinin sınıflandırma başarısını artırmasına ek olarak bilgisayarın işlem yükünü de azalttığını göstermektedir.

Bu çalışmayla, kullanımının yaygınlaşmasını öngördüğümüz SELDI-TOF-MS verileri üzerinden hızlı ve doğru tanıya yardımcı olacak sistemler geliştirerek, tıpta hatalı yumurtalık kanseri teşhisini en aza indirmeyi hedefleyen araştırmalara katkı sağlamayı amaçlamaktayız.

6. KAYNAKLAR

1. Global Cancer Observatory: Cancer Today: International Agency for Research on Cancer. <https://gco.iarc.fr/today>, Erişim Tarihi: 24.02.2021, 2020, Lyon, Fransa.
2. Global Cancer Observatory: Cancer Tomorrow. Lyon, Fransa: International Agency for Research on Cancer. <https://gco.iarc.fr/tomorrow>, Erişim Tarihi 24.02.2021, 2020, Lyon, Fransa.
3. Hamidou, Z., Causeret, S., Dabakuyo, T.S., Gentil, J., Arnould, L., Roignot, P., Altwegg, T., Poillot, M.L., Bonnetain, F., Arveux, P., 2010. Population-based Study of Ovarian Cancer in Côte d'Or: Prognostic Factors and Trends in Relative Survival Rates Over the Last 20 Years. *BMC Cancer*, 10, 622.
4. Torre, L.A., Trabert, B., DeSantis, C.E., Miller, K.D., Samimi, G., Runowicz, C.D., Gaudet, M.M., Jemal, A., Siegel, R.L., 2018. Ovarian Cancer Statistics. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68, 284-296.
5. Jacobs, I.J., Menon, U., 2004. Progress and Challenges in Screening for Early Detection of Ovarian Cancer. *Molecular & Cellular Proteomics*, 3(4), 355-366.
6. Zhang, D.Y., Ye, F., Gao, L., Liu, X., Zhao, X., Che, Y., Wang, H., Wang, L., Wu, J., Song, D., Liu, W., Xu, H., Jiang, B., Zhang, W., Wang, J., Lee, P., 2009. Proteomics, Pathway Array and Signaling Network-based Medicine in Cancer. *Cell Div.*, 4, 20.
7. Hood, L.E., Omenn, G.S., Moritz, R.L., Aebersold, R., Yamamoto, K.R., Amos, M., Hunter-Cevera, J., Locascio, L., 2012. New and Improved Proteomics Technologies for Understanding Complex Biological Systems: Addressing a Grand Challenge in the life Sciences. *Proteomics*, 12, 2773-2783.
8. Shruthi, B., Vinodhkumar, P., Selvamani, M., 2016. Proteomics: A New Perspective for Cancer. *Adv. Biomed. Res.* 5, 67.
9. Taşkın, V., Doğan, B., Ölmez, T., 2012. Yumurtalık Kanserinin Kütle Spektrometresi Verilerinden Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi ile Teşhisi. *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (BİYOMUT)*, 151-154, İstanbul.
10. Issaq, H.J., Veenstra, T.D., Conrads, T.P., Felschow, D., 2002. The SELDI-TOF MS Approach to Proteomics: Protein Profiling and Biomarker Identification. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 292(3), 587-592.
11. Poon, T.C., 2007. Opportunities and Limitations of SELDI-TOF-MS in Biomedical Research: Practical Advices. *Expert Review of Proteomics*, 4(1), 51-65.
12. Muthu, M., Vimala, A., Mendoza, O.H., Gopal, J., 2016. Tracing the Voyage of SELDI-TOF MS in Cancer Biomarker Discovery and its Current Depreciation Trend-need for Resurrection? *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 76, 95-101.
13. Tang, K.L., Li, T.H., Xiong, W.W., Chen, K., 2010. Ovarian Cancer Classification Based on Dimensionality Reduction for SELDI-TOF Data. *BMC Biyoinformatik* 11, 109.
14. Bougioukos, P., Cavouras, D., Daskalakis, A., Kossida, S., Nikiforidis, G., Bezezerianos, A., 2006. Feature Extraction and Analysis of Prostate Cancer Proteomic Mass Spectra for

- Biomarkers Discovery. General Secretariat for Research and Technology, 1.
15. Hu, Q.Y., Wang, K.Z., Ding, Y.H., Zheng, L.F., Liang, S.H., Lei, Z.M., Fu, W.G., Yan, L., 2010. Application of SELDI-TOF-MS Coupled with an Artificial Neural Network Model to the Diagnosis of Pancreatic Cancer. *Laboratory Medicine*, 41(11), 676–681.
 16. Wegdam, W., Moerland, P.D., Meijer, D., Jong, S.M de., Hoefsloot H.C.J., Kenter, G.G., Buist, M.R., Aerts, J.M.F.G., 2012. A Critical Assessment of SELDI-TOF-MS for Biomarker Discovery in Serum and Tissue of Patients with an Ovarian Mass. *Proteome Sci.*, 10, 45.
 17. Simsek, C., Sonmez, O., Yurdakul, A.S., Ozmen, F., Zengin, N., Keyf, A.I., Ozturk, C., 2013. Importance of Serum SELDI-TOF-MS Analysis in the Diagnosis of Early Lung Cancer. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 14(3), 2037-2042.
 18. Wu, J., Ji, Y., Zhao, L., Ji, M., Ye, Z., Li, S., 2016. A Mass Spectrometric Analysis Method Based on PPCA and SVM for Early Detection of Ovarian Cancer. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2016, 6169249.
 19. Cohen, A., Messaoudi, C., Badir, H., 2018. A New Wavelet-based Approach for Mass Spectrometry Data Classification, in *New Frontiers of Biostatistics and Bioinformatics*. Springer, Cham, 175-189.
 20. Thakur, A., Mishra, V., Jain, S.K., 2011. Feed Forward Artificial Neural Network: Tool for Early Detection of Ovarian Cancer. *Scientia pharmaceutica*, 79(3), 493-506.
 21. Sharma, A., Singh, S., 2016. Neural Network for Diagnosis of Ovarian Cancer Based on Proteomic Patterns in Serum. *Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(2), 25-27.
 22. Pei, S., Tong, L., Li, X., Jiang, J., Huang, J., 2017. Feed-forward Network for Cancer Detection, in *2017 13th International Conference on Natural Computation. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, (697-701). IEEE.
 23. Rahman, M.A., Muniyandi, R.C., Islam, K.T., Rahman, M.M., 2019. Ovarian Cancer Classification Accuracy Analysis Using 15-Neuron Artificial Neural Networks Model, in *2019 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd)*, IEEE, 33-38.
 24. FDA-NCI Klinik Proteomik Program Veri Bankası: <https://home.ccr.cancer.gov/ncifdaproteomics/ppatterns.asp>.
 25. Akkücü, U., 2009. Birçok Boyutlu Ölçekleme Tekniği Olarak Torgersen Ölçekleme Yöntemi ve Temel Bileşenler Analizi ile Karşılaştırması. *Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, (25), 311-322.
 26. Brunton, S.L., Kutz, J.N., 2019. *Data-driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems and Control*. Cambridge University Press.
 27. Gümüş, V., Soydan, N., Simsek, O., Aköz, M., Kırkgöz, M., 2016. Yağış-Akış İlişkisinin Belirlenmesinde Farklı Yapay Sinir Ağı Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 37-50.
 28. Ataseven, B., 2013. Yapay Sinir Ağları ile Öngörü Modellemesi. *Öneri Dergisi*, 10(39), 101-115.

Generation of Alternating Droplets with Different Viscosities in a Microfluidic Channel

Muhammad SAQIB¹, E. Yegan ERDEM^{*1,2}

¹*Bilkent University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ankara*

²*National Nanotechnology Research Center (UNAM), Ankara*

Geliş tarihi: 27.06.2021

Kabul tarihi: 15.09.2021

Abstract

Controlled alternating droplet formation in a microfluidic system can lead to an on-chip droplet-based pattern generation. This enables tracking of different samples individually within the same device. For instance, two different liquids can be segmented in a sequenced, repetitive fashion. In this work, we first show pattern generation by using liquids with unequal viscosities. Droplets of water and glycerol solution are generated in an alternating, repetitive fashion by using a microfluidic system with tapered, double T-junction. We also introduce a microsystem that has a mixing unit that generates a controlled sequence of droplets formed by mixing two different liquids on-chip. We believe that this study can have applications such as biological analysis, sorting, cell-based monitoring or on-chip chemical synthesis.

Keywords: Microfluidics, Droplet-based flow, Droplet dynamics, Alternating droplets

Mikroakışkan Kanalda Farklı Vizkozitelerde Sıralı Damlacık Oluşturulması

Öz

Mikroakışkan sistemlerde kontrollü ve sıralı damlacık oluşumu çip üzeri damlacık temelli desen oluşturulmasını sağlamak için uygundur. Bu sistemler farklı numuneleri tek bir cihazda ayrı ayrı inceleme fırsatı sunmaktadır. Örneğin iki farklı sıvıdan belli bir sıraya göre damlacıklar oluşturmak mümkündür. Bu çalışmada önce ikili T-birleşimli kanal geometrisi kullanarak farklı vizkozitelerdeki sıvılardan sıralı damlacık oluşumu gösterilmiştir. Damlacıklar su ve gliserol çözeltilerinden oluşturulmuştur. Ayrıca bu makale kapsamında iki farklı sıvının birleştirilmesi ile sonrasında damlacıkların sıra ile oluşturulmasını sağlamak için de tasarlanmış bir sistem çalışılmıştır. Bu çalışmaların biyoanaliz, tarama, hücre bazlı gözlem, kanal içi kimyasal sentez gibi pek çok uygulama alanı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Mikroakışkanlar, Damlacık temelli akış, Damlacık dinamiği, Sıralı damlacıklar

*Sorumlu yazar (Corresponding author): E. Yegan ERDEM, yeganerdem@bilkent.edu.tr

1. INTRODUCTION

Droplet based microfluidic systems manipulate samples individually without cross contamination which has potential applications in bioanalysis [1], drug delivery [2], single cell monitoring [3], chemical synthesis [4], and several other implementations requiring individual sample handling [5]. The circulating flow profile within the droplets also enables rapid mixing [6] which maintains uniform temperature and residence time for each droplet.

The success of these applications is dependent on the robustness and repeatability of droplet generation. There have been many studies in literature that demonstrate stable droplet generation by using flow-focusing, co-flowing and T-junction geometries. In flow-focusing, the dispersed phase fluid is separated into droplets by the carrier fluid (or continuous fluid) that flows perpendicular to the channel from two opposing sides, eventually breaking the stream into a series of droplets [7]. This method is a simple way of generating droplets, however the flow rate of the continuous phase channels should be identical for obtaining a stable droplet formation. Co-flowing geometries use a nozzle that is aligned with the flow of the continuous phase. The dispersed phase exiting the nozzle is applied shear force by the continuous flow that forms droplets [8]. In T-junction geometries, the dispersed phase and continuous phase meet at a T shaped junction, perpendicular to each other [9].

Most of the droplet-based microfluidic systems focus on generating droplets from a single source. However, being able to generate droplets from different sources has advantages such as running different analysis on the same device or generating a controlled array for biodetection. For this purpose, Hong et al. used a passive pressure regulator for obtaining alternating droplets formed at two separate T-junctions [10]. Zheng et al. used two merging channels at each dispersed phase side due to which two solutions merge at each end to form a single dispersed phase which generates alternating droplets because of the double T-junction geometry. They used it for protein crystallization experiments but due to limitations of the design they had to ensure

that the viscosity of both resulting dispersed phases is identical. In addition to that, the device was limited to generating droplets in the ratio 1:1 [11]. Jin et al. used a standard double T-junction device to generate alternating droplets of dispersed phases having different viscosities but there is no allowance for mixing solution at the dispersed phase inlet channels and this is important since most of the biological applications need some sort of mixing with a primer just before droplet generation so as to be able to time the reaction. Furthermore, in this case as well there is no allowance for generating alternating droplets in a ratio other than 1:1 [12]. Ngo et al. developed a computational model to study the effect of junction angle between the main and side channel and the effect of viscosity ratio between dispersed phase and continuous phase on alternating pattern formation but the effect of difference between viscosities of dispersed phase was not studied [13]. Han et al. performed three dimensional numerical simulations to study the effect of continuous phase viscosity, flow rate ratio, interfacial tension and contact angle on the droplet diameter in a double T-junction device [14]. Yao et al. performed experiments in a T-junction device to study the effect of continuous phase viscosity on droplet generation rate and droplet size [15]. Zhang et al. used a microfluidic oscillator at the continuous phase channel to control alternating droplet generation in a parallel T-junction device which forms droplets of dispersed phases having different viscosities. But the requirement of a microfluidic oscillator hinders the use of this device for generating alternating droplets in a ratio different than 1:1 [16]. Wu et al. used the same concept from Zhang et al. and applied it to the separation of *E. coli* from blood. Since it is an active method of generating droplets in parallel microfluidics, it makes the system slightly more complicated than a passive method such as the one we have used in the current work [17].

Surya et al. also showed a double T-junction geometry to study alternating droplet formation [18]. For demonstration they used the same type of fluid for droplet formation. Later the usage of

tapered channels for obtaining a stable alternating droplet formation was shown by Saqib et al. [19]. Here, double T-junction geometry was used, where the channels delivering the droplet phase were tapered. It was explained that the tapered geometry controls the Laplace pressure drop at the junction and assures the formation of droplets in turns. The alternating droplet formation was demonstrated with colored water.

Alternating droplet formation with tapered channels was later used in a study where hybrid nanoparticles were synthesized by merging two alternating droplets formed out of two aqueous solutions [20].

In this work, two droplet sources were delivered from oppositely located channels whereas the continuous fluid flows perpendicular to them. This is the first time that double T-junction has been used to generate droplets of dispersed phases having different viscosities in a ratio $n:1$ (where $1 < n \leq 3$). This enables the analysis of samples that do not need to be chemically or physically identical, making the device more versatile. Since 1:1 mixing has already been demonstrated to conduct a chemical reaction in such a device [20], it could be further used for chemical reactions that require mixing of reactants in an unequal proportion and having no restriction for viscosity matching of both reactants is an additional advantage. We further extend our study to a secondary design that can merge and mix two fluids before alternating pattern formation. This device uses a tapered double Y-junction where first two streams merge and form a droplet at each junction in a synchronized manner. Such a device would be ideal for protein crystallization experiments because it has been discussed by Zheng et al. [11] that the need to have identical viscosity for each dispersed in such a device is a challenge and having to make the viscosity identical by adding another fluid critically reduces the efficiency of the experiments. But in our device, there is no restriction for the viscosity to be identical for the two dispersed phases and we demonstrate that by making the dispersed phase channels tapered we can control the ratio of alternating droplet generation even when the viscosities are unequal.

2. FABRICATION AND EXPERIMENTAL SET-UP

2.1. Fabrication

The microfluidic system is fabricated by using microfabrication techniques used in the clean room of National Nanotechnology and Research Center (UNAM). First 4-inch silicon wafers are cleaned with acetone, isopropyl alcohol and deionized water. Then wafers are coated with the negative photoresist SU-8 2050 with a thickness of $70 \mu\text{m}$ by spin coating. After this, coated wafers are exposed to UV light for photolithography followed by development. This produces the mold for the microfluidic channel. To produce the actual device, polydimethylsiloxane mixture is poured on this mold and cured at room temperature. Once the curing is over, the microchannels formed in PDMS are separated from the mold. At the final step they are bonded to a glass slide for capping the channels via oxygen plasma treatment. The schematic showing the steps of fabrication is shown in Figure 1.

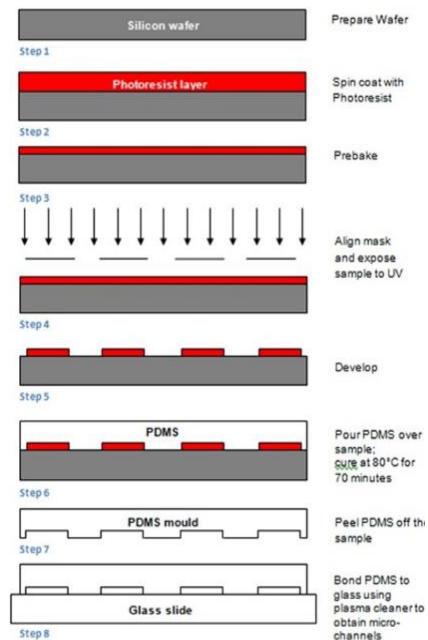


Figure 1. Fabrication steps of the microfluidic device

2.2. Experimental Set-up

The experimental set-up consisted of the microfluidic device, three syringe pumps for the delivery of liquids and a CCD camera attached to a microscope for imaging.

3. DESIGN

Two different microfluidic systems are used in this study. The first design used in this work is composed of two opposing microchannels for droplet phase delivery with tapered geometry as described in a previous study [19]. This narrowing

channel geometry ensures obtaining distinct pressure variation between two droplet phase streams, eventually enabling only one stream to generate a droplet at a time. In this device, alternating pattern of droplets with unequal viscosities were obtained. The schematic of this device is shown in Figure 2.

In the second microfluidic system, first, two fluids (water and glycerol solution) are merged, then a droplet is formed in an alternating fashion to obtain a pattern. Again, a tapered geometry is used for the inlet of the dispersed phases. The schematic of this design is shown in Figure 3.

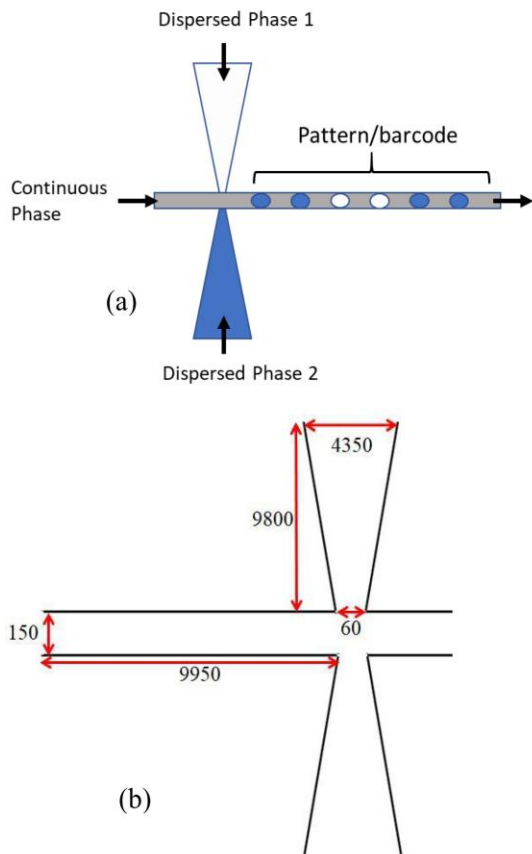


Figure 2. (a) Schematic of the microreactor used for pattern generation from two liquids with unequal viscosities, (b) Dimensions of the microfluidics device. All dimensions are in μm . The device is symmetric about the main channel

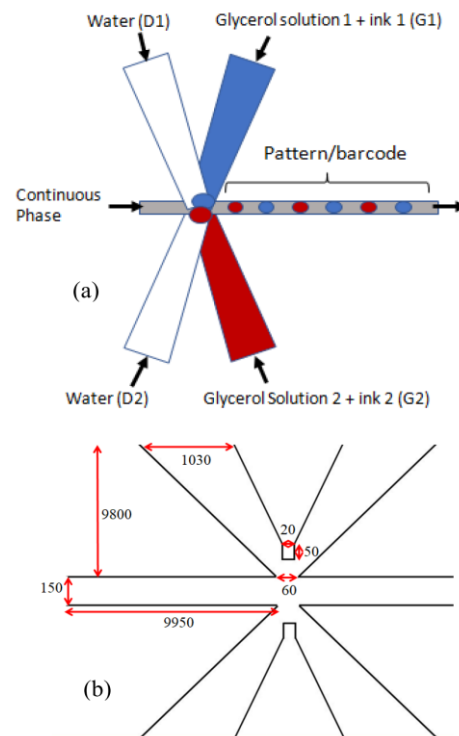


Figure 3. (a) Schematic of the microreactor used for pattern generation of droplets formed by mixing of two liquids. For the sake of identification dispersed phase streams have been labeled D1, D2, G1 and G2. (b) Dimensions of the microfluidics device. All dimensions are in μm . The device is symmetric about the main channel and all dispersed phase channels are identical

3. RESULTS AND DISCUSSION

For the droplet generation, the Ca number is calculated as shown below.

$$Ca = \frac{\mu U}{\gamma} = 7.94 \times 10^{-3} \quad (1)$$

Where the values of viscosity (μ), speed (U), cross-sectional area (A), continuous phase flow rate (Q_c) and surface tension (γ) are as follows:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.0562 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2, A = 1.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}, \\ Q_c &= 5.01 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}, U = 2.32 \times 10^{-3} \text{ m/s}, \\ \gamma &= 1.642 \times 10^{-2} \text{ N/m}. \end{aligned}$$

Since the Ca number is of the order of 10^{-3} , the interfacial forces are more dominant than shear forces because the droplet generation is in the squeezing regime [21]. As a result, the pressure distribution over the droplet governs the droplet generation mechanism instead of shear force applied by the continuous phase fluid.

The Bond number was calculated for this system, and since it is significantly less than 1, it may be reasonably inferred that gravitational forces have no effect.

The tapered geometry controls the Laplace pressure drop at the junction where droplets form; this is described in detail by Saqib et al [19]. When the liquid from one of the dispersed channel inlets enters the junction, the dispersed phase from the opposite side gets suppressed and does not enter the junction. By this way a controlled droplet sequence can be achieved.

In this study we demonstrate the formation of a droplet pattern by two liquids with different viscosities. Droplets are composed of water mixed with glycerol solution to obtain desired viscosities. In Figure 4a, a pattern with 2:1 ratio is formed. The viscosities of transparent dispersed phase 1 and blue dispersed phase 2 are 2.49 mPa.s and 1.0 mPa.s

respectively. The pattern formation can also be adjusted to obtain droplets in 3:1 sequence as shown in Figure 4b. The solutions used in this study are mixed before they are delivered to the microchannels.

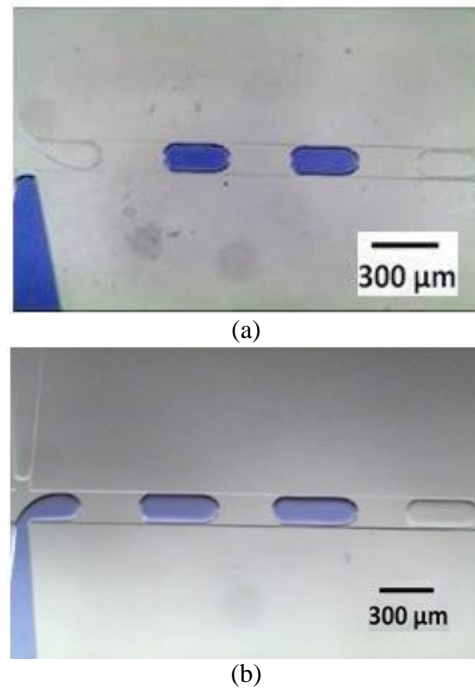


Figure 4. Pattern formation with liquids having different viscosities. (a) 2:1 ratio (b) 3:1 ratio. The dispersed phase 1 and the dispersed phase 2 have volumetric flow rates as 0.2 $\mu\text{l}/\text{min}$ and 0.15 $\mu\text{l}/\text{min}$ respectively and the continuous phase flow rate is 2.0 $\mu\text{l}/\text{min}$. Dispersed phase 2 contains food coloring as identification

In this study patterns of droplets that are formed after mixing two liquids on-chip are also demonstrated. Here, each droplet is formed by merging an aqueous glycerol solution and water to obtain desired viscosities. The glycerol solutions are dyed with ink in order to distinguish them. Figure 5 shows pattern formation with this method. At first, droplets

with identical viscosities (3.71 mPa.s) are formed and a pattern was generated from droplets of opposing streams. Glycerol solution is dyed in order to follow the pattern. The 1:1 and 2:1 pattern formation are achieved (Figure 5a, 5b). Then patterns are formed by droplets having different viscosities. In this study the glycerol solution having the red dye is at a higher viscosity (10.22 mPa·s) than the one with the black dye (3.71 mPa·s). As this device supplies the advantage of mixing solutions in-situ, it is more practical when a series of droplets with content more than one type of liquid is needed. Figures 6a and 6b show pattern formation in 1:1 and 2:1 ratio respectively for the different viscosity case.

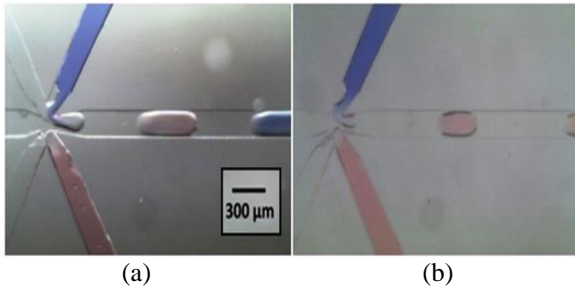


Figure 5. Droplet pattern formation with a mixing unit. (a) Droplets with identical viscosities are formed in a 1:1 alternating ratio. (b) Droplets with identical viscosities are formed in a 2:1 alternating ratio

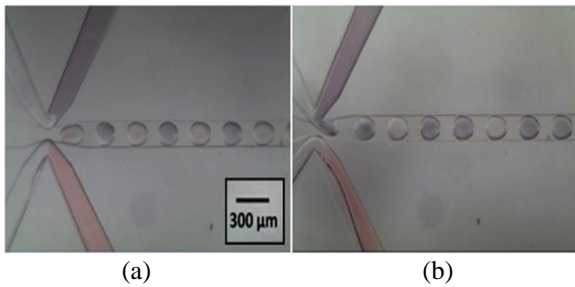


Figure 6. (a) Droplets with different viscosities are formed in a 1:1 alternating ratio. (b) Droplets with different viscosities are formed in a 2:1 alternating ratio

Droplet stream with higher viscosity (mixture of D2 and G2) requires higher shear force to be applied when forming droplets. Therefore, more droplets are generated from the less viscous phase (D1 and G1)

in the pattern. Knowing this, the number of droplets from each stream can be controlled by flow rates.

A droplet forms when the net pressure imposed by the scattered phase is less than the pressure exerted in the upper stream (due to the continuous phase). The difference between the pressure in the scattered phase inlet channel and the Laplace pressure at the interface is the net pressure exerted by the dispersed phase. Hence we can determine the variation of pressure distribution at the junction by evaluating the Laplace pressure.

The graphical representation of the variation of the laplace pressure is developed by first measuring the radii of curvature of the dispersed phase streams from each side and then substituting these values into the formula for the Laplace pressure drop, given in equation (2), where R_T is the radius of curvature of the tail of the droplet and R_H is the radius of curvature of the head of the droplet.

$$\Delta P_{Lmax} = \gamma \left(\frac{1}{R_{Tc}} - \frac{1}{R_{Hc}} \right) \quad (2)$$

As it can be seen from the graph in Figure 7a, the case where droplets are generated in the ratio 1:1, the laplace pressure variation remains almost identical for each dispersed phase and therefore the opposing streams generate droplets one by one in a synchronized manner.

In the case where droplets are generated in the ratio 2:1, the less viscous mixture of D1 and G1 produce more droplets since they are at a higher flow rate and also since their mixture can be sheared with greater ease than the mixture of D2 and G2 that have a more viscous mixture. The variation of Laplace pressure, shown in Figure 7b, in this case further explains the droplet generation mechanism. When the mixture of D2 and G2 generate a droplet, the rate laplace pressure drop is very high since the mixture is more viscous. But when D1 and G1 generate a droplet the rate of laplace pressure drop is lower

for the first drop which gives the opportunity to the second drop to be formed in a consecutive manner since D2 and G2 are still recovering from the laplace pressure drop from the previous droplet generation. In this way the dispersed phases keep alternating in a 2:1 ratio in a synchronized manner.

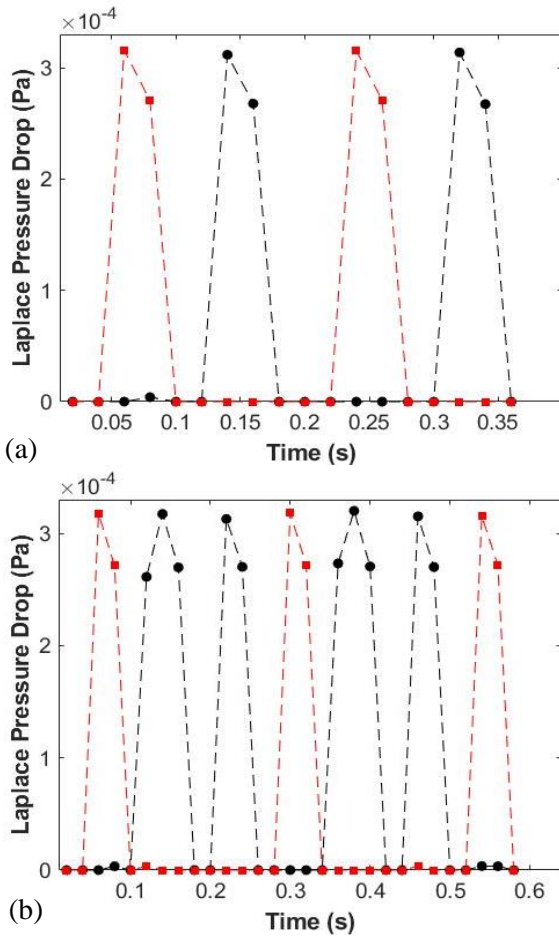


Figure 7. Laplace pressure drop of droplet phases at the junction. (a) In the case where droplets are formed in 1:1 ratio with continuous phase at $2.5 \mu\text{L}/\text{min}$, less viscous stream at $0.22 \mu\text{L}/\text{min}$ and high viscous stream at $0.3 \mu\text{L}/\text{min}$. (b) In the case where droplets are formed in 2:1 ratio. Flow rate of the continuous phase is $2.5 \mu\text{L}/\text{min}$, less viscous stream is at $0.35 \mu\text{L}/\text{min}$ and high viscous stream at $0.3 \mu\text{L}/\text{min}$

4. CONCLUSION

Pattern formation from droplets with different viscosities is demonstrated by using a tapered channel geometry. Forming droplets containing two different liquids within the same device is also achieved. This tool enables a device that can be used in monitoring or analysis of samples within droplets in a desired order. It also makes it possible to obtain a set of droplets carrying reagents to be merged at a later phase within the device for material synthesis in controlled concentrations. This device can also be used in applications where alternating droplet generation has to be achieved between fluids with significantly different viscosities specially in applications where some sort of marker has to be mixed with the dispersed phase just prior to droplet generation. Using Laplace pressure calculations obtained by utilizing the measured radii of curvature of the droplet during the droplet generation process, we infer how the alternation takes place for ratios 1:1 and 2:1.

5. ACKNOWLEDGEMENT

E.Y. Erdem would like to acknowledge the Tübitak for funding this work under the project number 115S112.

6. REFERENCES

1. Guo, F., Lapsley, M.I., Nawaz, A.A., Zhao, Y., Lin, S.C.S., Chen, Y., Yang, S., Zhao, X. Z., Huang, T.J., 2012. A Droplet-based, Optofluidic Device for High-throughput, Quantitative Bioanalysis. *Anal. Chem.*, 84(24), 10745-10749.
2. Brzeziński, M., Socka, M., Kost, B., 2019. Microfluidics for Producing Polylactide Nanoparticles and Microparticles and Their Drug Delivery Application. *Polym. Int.*, 68(6), 997-1014.
3. Shembekar, N., Hu, H., Eustace, D., Merten, C.A., 2018. Single-cell Droplet Microfluidic Screening for Antibodies Specifically Binding to Target Cells. *Cell Reports*, 22(8), 2206-2215.

4. Erdem, E.Y., Cheng, J.C., Doyle, F.M., Pisano, A.P., 2014. Multi-Temperature Zone, Droplet-based Microreactor for Increased Temperature Control in Nanoparticle Synthesis. *Small*, 10(6), 1076-1080.
5. Feng, H., Zheng, T., Li, M., Wu, J., Ji, H., Zhang, J., Zhao, W., Guo, J., 2019. Droplet-based Microfluidics Systems in Biomedical Applications. *Electrophoresis*, 40(11), 1580-1590.
6. Özkan, A., Erdem, E.Y., 2015. Numerical Analysis of Mixing Performance in Sinusoidal Microchannels Based on Particle Motion in Droplets. *Microfluidics and Nanofluidics*, 19(5), 1101-1108.
7. Lashkaripour, A., Rodriguez, C., Ortiz, L., Densmore, D., 2019. Performance Tuning of Microfluidic Flow-focusing Droplet Generators. *Lab Chip*, 19, 1041-1053.
8. Rahimi, M., Shams Khorrani, A., Rezai P., 2019. Effect of Device Geometry on Droplet Size in Co-axial Flow-focusing Microfluidic Droplet Generation Devices. *Colloid. Surf. A.*, 570, 510-517.
9. Chakraborty, I., Ricouvier, J., Yazhgur, P., Tabeling, P., Leshansky, A.M., 2019. Droplet Generation at Hele-shaw Microfluidic T-junction. *Physics of Fluids*, 31, 022010.
10. Hong, J., Choi, M., Edel, J.B., deMello, A.J., 2010. Passive Self-synchronized Two-droplet Generation. *Lab. Chip.*, 10, 2702-2709.
11. Zheng, B., Tice, J.D., Ismagilov, R.F., 2004. Formation of Droplets of Alternating Composition in Microfluidic Channels and Applications to Indexing of Concentrations in Droplet-based Assays. *Anal. Chem.*, 76, 4977-4982.
12. Jin, B.J., Kim, Y.W., Lee, Y., Yoo, J.Y., 2010. Droplet Merging in a Straight Microchannel Using Droplet Size or Viscosity Difference. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(3), 035003.
13. Ngo, I.L., Woo Joo, S., Byon, C., 2016. Effects of Junction Angle and Viscosity Ratio on Droplet Formation in Microfluidic Cross-junction. *Journal of Fluids Engineering*, 138(5).
14. Han, W., Chen, X., Hu, Z., Yang, K., 2018. Three-dimensional Numerical Simulation of a Droplet Generation in a Double T-junction Microchannel. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 17(2), 025502.
15. Yao, J., Lin, F., Kim, H.S., Park, J., 2019. The Effect of Oil Viscosity on Droplet Generation Rate and Droplet Size in a T-junction Microfluidic Droplet Generator. *Micromachines*, 10(12), 808.
16. Zhang, Y.Y., Xia, H.M., Wu, J.W., Zhang, J., Wang, Z.P., 2019. Synchronized Generation and Coalescence of Largely Dissimilar Microdroplets Governed by Pulsating Continuous-phase Flow. *Applied Physics Letters*, 114(7), 073701.
17. Wu, J., Xia, H., Wang, W., Foo, Y., Wang, Z., Du, H., 2020. A Droplet Platform Capable of Handling Dissimilar Liquids and its Application for Separation of Bacteria from Blood. *Biomicrofluidics*, 14(3), 034102.
18. Surya, H.P.N., Parayil, S., Banerjee, U., Chander, S., Sen, A.K., 2015. Alternating and Merged Droplets in a Double T-junction Microchannel. *Bio Chip J.*, 9, 16-26.
19. Saqib, M., Şahinoğlu, O.B., Erdem, E.Y., 2018. Alternating Droplet Formation by Using Tapered Channel Geometry. *Sci. Rep.*, 8(1), 1-9.
20. Wahab, M.A., Erdem, E.Y., 2020. Multi-step Microfluidic Reactor for the Synthesis of Hybrid Nanoparticles. *J. Micromech. Microeng.*, 30(8), 085006.
21. Garstecki, P., Fuerstman, M.J., Stone, H.A., Whitesides, G.M., 2006. Formation of Droplets and Bubbles in a Microfluidic T-junction-scaling and Mechanism of Break-up. *Lab on a Chip*, 6(3), 437-446.

Afşin-Elbistan Termik Santral Külünün Standartta Uygun Hale Getirilmesi ve Beton Katkısı Olarak Değerlendirilmesi

Hüseyin TEMİZ^{*1}, Kadir ELBİSTAN², Betül PAKÖZ³

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

²Devlet Su İşleri 20. Bölge Müdürlüğü, Kahramanmaraş

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 25.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Özet

Türkiye’de sanayinin gelişmesi ve yaygınlaşması için enerjiye gereksinim vardır. Bu nedenle enerji üretiminin artırılması, enerjiden tasarruf sağlanması ve binaların yalıtımına önem verilmesi, atık maddelerin değerlendirilmesi gibi konuların önemi giderek artmaktadır. 2019 yılı verilerine göre Türkiye’de elektriğin yaklaşık %57,8’i fosil yakıtlardan üretilmektedir. Fosil yakıtların yaklaşık %65’ini kömür oluşturmaktadır. Kahramanmaraş Afşin-Elbistan Termik Santrali, linyit kömürü ile elektrik üreten santrallerden biridir. Afşin-Elbistan Termik Santrali’nde yılda yaklaşık iki milyon ton uçucu kül üretilmekte ve bu külün çok azı kullanılmaktadır. Bu uçucu külün yeterince kullanılmamasının nedeni; kimyasal yapısının standartların öngördüğü kriterlere uygun olmamasıdır. Atık külün depolama sorunu yanında, çevrenin kirlenmesine önemli derecede etkisi de bulunmaktadır. Diğer yandan endüstriye kazandırılması halinde ülke ekonomisine önemli oranda katkı sağlaması bilinen bir gerçektir. Bu deneysel çalışmada, Kayseri bimsi, cam atığı tozu, az oranda kolemanit ilaveleriyle Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külü (AEUK) standartta uygun hale getirilmiştir. Basınç dayanımı, priz süresi, hacimsel genleşme, donma-çözülme gibi deneyler yapılmıştır. Katkı maddeleri sayesinde, AEUK’nın betonda kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basınç dayanımı, Bims, Dayanıklılık, Kolemanit, Uçucu kül

Investigation of the Effects of Afşin-Elbistan Thermal Power Plant Ash on Concrete

Abstract

Turkey are in need of energy for development and expansion of the industry. For this reason, issues such as increasing energy production, saving energy and attaching importance to the insulation of buildings, and utilizing waste materials are increasing. According to data from 2019, about 57.8% of electricity is produced from fossil fuels in Turkey. About 65% of fossil fuels are coal. Kahramanmaraş Afşin-Elbistan Thermal Power Plant is one of the power generating plants with lignite coal. Approximately two million tons of fly ash is produced annually at Afşin-Elbistan Thermal Power Plant and very little of this ash is used. The reason why this fly ash is not used enough; chemical structure does not meet the criteria stipulated by the standards. In addition to the storage problem of waste ash, it also has a significant

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Hüseyin TEMİZ, [htemiz@ksu.edu.tr](mailto:h temiz@ksu.edu.tr)

impact on environmental pollution. On the other hand, it is a known fact that if it is brought into the industry, it will contribute significantly to the national economy. In this experimental study, Kayseri pumice, glass waste powder, and the low powder colemanite additions, Afşin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash were made compatible with the standard. Thanks to the additives, it was determined that the adverse effects of Afşin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash on concrete were eliminated.

Keywords: Bims, Colemanite, Compressive strength, Durability, Fly ash

1. GİRİŞ

2019 verilerine göre Türkiye’de elektrik üretiminde en büyük pay %37 ile kömür santrallerinin olmuştur. Doğalgazın oranı 2018’e göre %31’den %18,86’ya inmiştir. İki fosil kaynağın toplamı %57,8’dir [1].

Beton diğer yapı malzemelerine göre; daha kolay şekil verilebilir olması, ekonomik ve dayanıklı olması, üretiminde daha az enerji tüketilmesi, her yerde üretilebilir ve estetik olması özellikleriyle en çok kullanılan yapı malzemesidir [2]. Bununla beraber bazı durumlarda normal dayanımlı betonun kullanımı yetersiz kalmaktadır. Betondan sadece dayanım değil bunun yanında durabilite de istenmektedir. Bu durumda betonun durabiliteye göre tasarımı ön plana çıkmaktadır. Genel olarak betonun çevresel etkilere diğer bir deyişle durabiliteye göre tasarımı bu iki parametreye göre yapılır. Betondaki maksimum su/çimento oranı ve minimum çimento dozajı gibi kısıtlamaların ne ölçüde gerçekleşebileceği (yani çevresel etki sınıfına bağlı olarak maksimum su/çimento oranı belirli bir değeri aşamaz ve çimento dozajı da öngörülen minimum değerinin altına inemez) doğrudan beton agregasının türüne, granülometrisine ve standartlarına uygun olmasına bağlıdır [3].

Kömür yakan termik santrallerin bir yan ürünü olan uçucu kül yapay puzolandır. Uçucu külün beton yapımında kullanılabilmesi için sahip olması gereken özellikler ve sınırlamalar standartlarda belirtilmektedir. Bu sınırlamaların bazıları SO₃ içeriği, serbest CaO içeriği, MgO içeriği, alkali oksit içeriği olarak sıralanabilir. Bu kimyasal içerikleri yüksek olan küller, çimento ikamesi için veya kompoze çimento üretiminde kullanılamamaktadır. Dolayısıyla bu küller depo

sahalarında uzun yıllar saklanmakta, zamanla yeraltı suyu karışarak veya havalandırılarak kirlilik ve çevresel tehdit oluşturabilmektedir [4]. Uçucu kül katkısı genel olarak betonun kohezif özelliğini arttırmakta; ancak akışkanlığını azalttığı için bir akışkanlaştırıcı madde ile birlikte kullanılması gerekebileceği belirtilmektedir [5]. Puzolanların kullanım amaçları arasında beton teknolojisinde enerji tasarrufu sağlamak, taze ve sertleşmiş betona bazı yeni özellikler kazandırılması bulunmaktadır. Puzolanların etkinlikleri, mineralojik ve kimyasal yapısına, aktivitesine, kullanım miktarına ve betonun bileşim özelliklerine bağlıdır. Yüksek miktarda CaO içeren C sınıfı uçucu küller ile silis dumanı betonun ilk yaşlardaki ve nihai dayanımlarını arttırmaktadır. Bunların süper akışkanlaştırıcılarla kullanılması ile yüksek mukavemetli beton üretiminde yeni bir çığır açılmıştır [6]. Uçucu küller betonda termik rötreyi önlemek için kütle betonunu yapımında kullanılmaktadır. Bu malzemelerin doğrudan betona katılması durumunda büyük enerji tasarrufu sağlanabilir. Uçucu küller çok ince olduklarından geçirimsiz beton üretiminde de kullanılabilir [7]. Afşin-Elbistan Termik Santrali’nin 1. ve 2. ünitelerinden alınan numunelerin kimyasal analizleri yapılmıştır. Belirlenen kimyasal analiz sonuçlarına göre reaktif CaO oranı (%53,44) %10’un üzerinde olduğu için TS EN 197-1’e göre W sınıfına girdiği, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplam değerinin (%30,69) %50’nin altında kalması nedeniyle sınıf dışı kaldığı, yine SiO₂ oranının (%18,27) %25’in altında kalması nedeniyle sınıf dışı olduğu belirtilmiştir [8]. Diğer taraftan Afşin Elbistan Termik Santrali, ülkemizdeki en yüksek enerji üretme ve yan ürün olarak uçucu kül üretme kapasitesine sahiptir. Üretilen uçucu külün içerdiği yüksek serbest CaO, düşük SiO₂ ve yüksek SO₃ oranları nedeniyle TS EN 197-1’e uymadığı için tüketim oranı düşük kalmakta çözüm olarak depolama yoluna gidilmektedir [9].

Pomza oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuma nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçüğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan hafif, suda uzun süre yüzebilen, permeabilitesi düşük ve yalıtımı oldukça yüksektir. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunabilmektedir. Kayacın içerdiği SiO₂ oranı, kayaca abrasif özellik kazandırmaktadır. Al₂O₃ bileşimi ise ateş ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırır. Türkiye'de pomza yatakları, Ürgüp-Avanos ve Kayseri'nin Talas, Tomarza-Develi bölgesinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca Bitlis, Van, Ağrı, Kars, Ankara, Isparta ve Muğla illerinde bulunmaktadır [10].

Bor kristalize görünüm ve optik özellikleri bakımından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Günümüzde Dünya bor rezervlerinin ve üretiminin en fazla olduğu iki ülke A.B.D. ve Türkiye'dir. Önemli üretici ülkelerin bu üretimdeki payları sırasıyla, Türkiye %33, A.B.D. %28, Rusya %23 ve diğer ülkeler %16 düzeyindedir [11].

Amorf yapıya, yüksek silis (SiO₂>%70) içeriğine ve yüksek yüzey alanına sahip olan camın geri dönüşümü çevresel bir konudur. Çevrede bulunan camın erimez yapısı ve aşırı geri dönüşüm maliyeti geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Puzolanik özellik gösteren çimento inceliğindeki cam tozu alternatif bir çimento katkı malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Cam tozundan beklenen etki beton veya harcın dayanım ve dayanıklılığının iyileştirilmesidir. Amorf cam tozu puzolanik aktivite göstermesi sayesinde çimento ve suyun

hidratasyonu sonucunda oluşan Ca(OH)₂'i, içeriğinde yüksek oranda bulunan SiO₂ ile bağlayarak betona dayanım kazandıran kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadır [12].

Yapılan araştırmada cam tozunun betonun basınç dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Araştırmada çimento yerine sırasıyla %10, %15 ve %20 oranlarda cam tozu alınarak karışımlar hazırlanmış ve numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları test yöntemi ile bulunmuştur. Katkılı numunelerden bulunan basınç dayanımı değerleri referans numune basınç dayanımı değeri ile karşılaştırılmıştır. Cam tozu katkı numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerinin referans numune basınç dayanımından yaklaşık %20 daha büyük çıktığı belirtilmiştir [13].

Bu araştırmada, Kayseri pomzası (bims), cam atığı tozu, az oranda kolemanit ilaveleriyle AEUK'nın kimyasal yapısı standarda uygun hale getirilmiştir. Katkı maddeleri sayesinde, AEUK'nın neden olduğu olumsuz etkilerinin giderildiği belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan AEUK Afşin-Elbistan Termik Santralinden, Kayseri pomzası (KP) Kayseri yöresinden, kolemanit (KO) Balıkesir/Bigadiç çevresinden sağlanmış ve cam tozu (CT) ise camcıların atık camlarından elde edilmiştir. Şekil 1'de toz halindeki mineral katkı maddeleri görülmektedir.



Şekil 1. a) AEUK, b) P, c) K, d) C

AEUK'nın standarda uygun hale getirilerek C40/50 MPa dayanımlı beton üretilmesi

hedeflenmiştir. Deneylerde kullanılan bağlayıcı malzemelerin bazı kimyasal ve fiziksel analizleri

Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir. Araştırmada optimum karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla eksiltelen CEM I çimentosunun yerine kütlece % olarak beş farklı oranda AEUK ve ince öğütülmüş cam tozu (CT), pomza (KP) ve kolemanit tozları (KO) kullanılmıştır. Değişik oranlarda katkı seçilmesinde numunelerin dayanım, dayanıklılık ve ekonomik olması gibi amaçlar esas alınmıştır. Çizelge 3’te deneme karışımları verilmiştir. Her bir karışım için altı adet 10 cm boyutlu beton küp numuneleri üretilmiştir. Numunelerin 7 ve 28

günlük basınç dayanımı değerleri ve malzemelerin kimyasal analizleri göz önünde bulundurularak optimum karışım oranı belirlenmiştir. Buna göre, yeni karışımında çimento miktarı kütlece %40 azaltılmış yerine %20 AEUK, %10 KP, %5 KO ve %5 CT kullanılmış ve miktarlar Çizelge 4’te verilmiştir. Araştırmanın bundan sonraki bölümünde üretilen numuneler Çizelge 4’te verilen referans (REF) ve karışım (6)’da belirtilen oranlar kadar alınmıştır. Beton karışım hesabında TS 802 esas alınmıştır [14].

Çizelge 1. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri

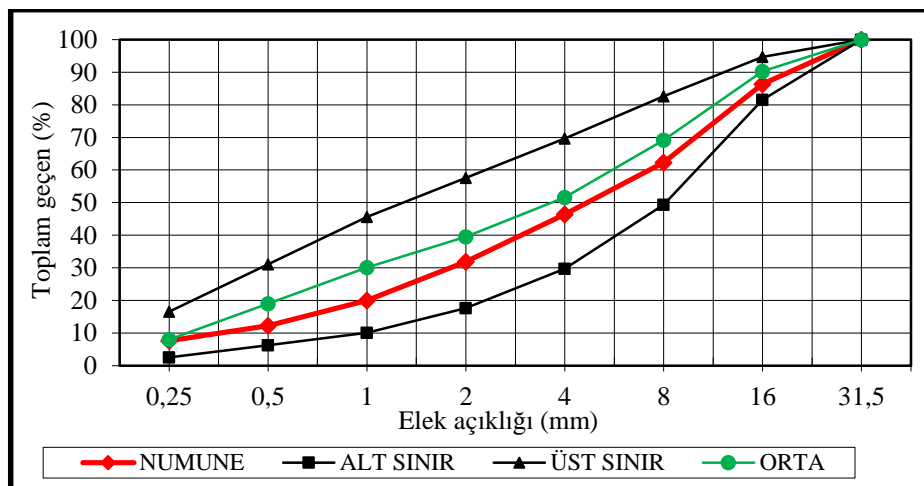
Katkı türü	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K. Kaybı
CEM I 42.5R	19,40	5,36	3,79	64,30	2,25	2,47	0,90	0,09	1,44
CEM I ₆₀₊ AEUK ₂₀ +KP ₁₀ +KO ₅ +CT ₅	26,83	6,62	3,47	47,96	1,40	3,96	1,02	0,92	5,79
Çimentosuz AEUK ₂₀ +KP ₁₀ +KO ₅ +CT ₅	40,33	9,27	4,53	24,15	2,09	5,32	1,10	2,15	7,58

Çizelge 2. Bağlayıcı malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Özgül yüzey (cm ² /gr)	Elek üzeri kalan (%)	
			90 µ	45 µ
CEM I 42,5R	3,15	3480	0,1	8,2
CEM I ₆₀₊ AEUK ₂₀ +KP ₁₀ +KO ₅ +CT ₅	2,93	3790	6,2	21,3

Çalışmada kullanılan agrega Aksu-Nehir malzemesinden agrega üreten işletmeden temin edilmiştir. İşletmeden alınan dere agregası kırılmış ve kırılmamış karışımlardan meydana

getirilmektedir. Agreganın tane dağılımı TS EN 12620’de öngörülen kriterlere uygun hale getirilmiştir [15]. Agreganın tane dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Agreganın tane dağılımı

Kumun özgül ağırlığı 2,66 kg/dm³, çakılın özgül ağırlığı 2,7 kg/dm³; su emme oranları ise kumda %1,9, ince çakılda %0,4 ve iri çakılda %0,3 bulunmuştur.

Çalışmalarda beton karışımı için önerilen sınır değerler TS EN 206 'ya göre zararlı kimyasal ortam XA3 sınıfı ortam standartlarına göre tasarım

yapılmıştır. C40/50 MPa dayanımlı beton üretilmesi hedeflenmiştir. Karışımlarda çimento dozajı 420 kg/m³ alınmıştır. S/Ç oranı 0,44 olarak alınmış ve taze betonun slump (çökme) değeri 13 cm olarak belirlenmiştir. (TS 802, 2009 ve TS EN 2006, 2013). Taze betonda aynı çökme değerlerini bulmak için bir ticari ürün olan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 3. 1 m³ beton karışımı için malzeme miktarları (deneme)

Numune adı	Beton bileşenleri (kg/m ³)					Katkı malzemeleri (kg/m ³)				
	Su	CEMI	Çakıl		Kum	Kim. katkı	KO	KP	CT	AEUK
			4/12	12/24						
REF	184,8	420	447	536	792	0,42				
1. (CEMI ₈₀ +KO ₅ +KP ₅ +AEUK ₅)	184,8	252	447	536	792	3,36	21	21	21	21
2. (CEMI ₇₅ +KO ₅ +CT ₅ +KP ₅ +AEUK ₁₀)	184,8	315	447	536	792	3,36	21	21	21	42
3. (CEMI ₆₅ +KO ₁₀ +CT ₅ +KP ₁₀ +AEUK ₁₀)	184,8	273	447	536	792	3,36	42	21	42	42
4. (CEMI ₆₀ +KO ₁₀ +KP ₁₀ +AEUK ₂₀)	184,8	252	447	536	792	3,36	42	42	-	84
5. (CEMI ₆₀ +KP ₁₀ +CT ₁₀ +AEUK ₂₀)	184,8	252	447	536	792	3,36	-	42	42	84

Çizelge 4. 1 m³ beton karışımı için malzeme miktarları

Numune adı	Beton bileşenleri (kg/m ³)					Katkı malzemeleri (kg/m ³)				
	Su	CEMI	Çakıl		Kum	Kim. katkı	KO	KP	CT	AEUK
			4/12	12/24						
REF	184,8	420	447	536	792	0,42	-	-	-	-
6. (CEMI ₆₀ +KO ₅ +CT ₅ +KP ₁₀ +AEUK ₂₀)	184,8	252	447	536	792	3,36	21	42	21	84

Çizelge 4'te verilen değerlerin alınmasında basınç dayanımı yanında, katkı maddelerinin rezerv durumları, taze ve sertleşmiş betonların özellikleri üzerine katkıların etkileri gibi durumlar da dikkate alınmıştır.

2.1. Metot

Çimento hamuru için gerekli normal kıvam su oranı, priz süreleri ve hacimsel genleşme değerleri bulunmuştur. Normal kıvam su oranı ve priz

süreleri vikat cihazı, hacimsel genleşme ise Le Chatelier kalıbıyla bulunmuştur. Çimento hamurunda Le Chatelier cihazı kullanılarak yapılan testle, çimento içinde bulunabilen ve su ile temas edince şişerek betona zarar verebilen, serbest CaO ve MgO'nun çimento hamurunda oluşturduğu hacim genişlemesi miktarının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3.a'da Vicat cihazı ile işlem, Şekil 3.b'de Le Chatelier kalıbı ile hacimsel genleşme değerini bulma işlemi verilmiştir [16].



Şekil 3. a) Priz süresi tayini işlemi, b) Hacimsel genişleme işlemi

Taze betonun işlenebilmesi hakkında bilgi edinmek için çökme testi işlemi yapılmıştır. Test işleminde çökme hunisinden yararlanılmıştır.

Beton karıştırılması ve çökme değerinin bulunması işlemi Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Betonun karıştırılması ve çökme değerinin bulunması

Beton basınç dayanımı 10 cm boyutlarındaki standart küp numunelerin test edilmesiyle saptanmıştır. Numune hazırlanmasında TS EN 12390-2 esas alınmıştır [17]. Buna göre laboratuvar ortamında hazırlanan karışımlar içi hafifçe kalıp yağı ile yağlanmış kalıba iki katman halinde ve her katman 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Uygun ortamda 24 saat bekletilen numuneler kalıptan çıkarılıp musluk suyu bulunan

kür tanklarında deney yaşına kadar $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bekletilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Optimum karışım oranını bulmak için hazırlanan numuneler 7 ve 28; araştırmanın diğer bölümü için hazırlanan numuneler (REF ve 6) ise 7, 28 ve 56 günlük yaşlarda test edilmiştir. Şekil 5'te küp numuneler ve test işlemi verilmiştir.



Şekil 5. Bir grup küp numune ve test edilme işlemi

Alkali-silika reaksiyonu hızlandırılmış, ASTM C 1260 standartlarına göre yapılmıştır. Bu yöntemle göre REF ve 6 nolu karışım için belirlenen oranlarda alınan bağlayıcı malzeme ve standart kumla 25*25*285 mm boyutlarında her karışım için üç adet harç prizması hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler bir gün kalıpta bekletildikten sonra 14 gün, 80°C sıcaklıktaki %3'lük sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinde bekletilmiştir. Numune boyları, 1 günlük ve 14 günlük NaOH çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde bulunmuştur. Şekil 3'te kür edilen

numuneler ve test işlemi görülmektedir. Alınan bu numunelerin 0,001 mm duyarlılıkta bir boy ölçer ile boyları belirlenmiştir. Son ölçülen boy-ilk ölçülen boy farkının ilk boya oranlanması ile boy değişim yüzdesi bulunmuştur. Bulunan değer standardın öngördüğü koşullarla karşılaştırılması neticesi alkali-silika reaksiyonu bakımından karışımın uygun olup olmadığı konusunda karar verilmektedir [18]. Şekil 6'da alkali silika reaksiyonunu bulmak için hazırlanan prizma numuneleri ve test işlemi görülmektedir.



Şekil 6. Prizma numuneler ve test işlemi

Kılcal su emme değerini bulmak için REF ve 6'nolu karışımlardan 3'er adet 10 cm boyutlu küp numuneler 24 saat 105 °C'de etüvde kurularak etüv kuru hale getirildi ve kütleleri belirlendi (W1). Sonra numuneler alt yüzeylerinden su ile temas ettirilerek kılcal su emme deneyine tabi tutuldu. Kılcal yolla emilen su miktarının belirlenebilmesi için 60. dakika sonunda numune

tartılarak ağırlığı bulundu (W2). Ölçülen değerlerden hareket edilerek kılcallık katsayısı; $k_c = (Q/A)^2 \times (1/t)$ ifadesi ile bulunmuştur [19]. Şekil 7'de etüvde kurutma işlemi görülmektedir.

k_c = Kılcal su emme katsayısı (cm²/s)

Q = t zaman aralığında ölçülen su miktarı (cm³)

A = Kılcal su emme yüzey alanı (cm²)

Çalışmada çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini deneyi için Şekil 8’de görülen donma/çözülme cihazı kullanılmıştır. REF ve 6 nolu karışımlardan 3 adet olmak üzere toplam 6 adet 10 cm boyutlu küp numune teste tabi tutulmuştur. Bunun için numuneler etüvde 24 saat kurutulduktan sonra ilk ağırlıklarının belirlenebilmesi için hassas terazi ile tartılmıştır. REF ve 6 nolu karışıma ait numuneler

2 saat su içerisinde bekletildikten sonra donma/çözülme cihazına konmuştur. Donma/çözülme kabininde -22 °C’de 1,5 saat donma ve 30 dakikada çözülme işlemi otomatik olarak ayarlanmış ve yapılmıştır. Bu yöntemle 28 çevrim (donma/çözülme) uygulanmıştır. Deney sonunda kütle kaybı ve basınç dayanımı değerlerindeki değişimler incelenmiştir.



Şekil 7. Numunelerin kurutulması



Şekil 8. Donma/çözülme test işlemi

Böhme aşınma değerinin bulunması için Çizelge 4’teki REF ve 6 nolu numunelerden 3’er adet küp numuneler üretilmiştir. Boyutları 71*71*71 mm olarak üretilen numuneler 28 gün kürde bekletildikten sonra kurumak üzere etüve bırakılmıştır. 24 saat etüvde bekletilen numuneler çıkarıldıktan sonra hassas terazide tartılmış ve kumpas ile 4 yüzeyinin ölçümü yapılmış ve kaydedilmiştir. Deneyde, başlangıç ağırlıkları bulunarak Böhme cihazının döner diski üzerine yerleştirilen numunelere sabit aşındırma kuvveti uygulanmıştır. Cihazın çalıştırılmasıyla birlikte sürtünme yolu üzerine dökülen 22 g zımpara tozunun aşındırıcı etkisine maruz bırakılan numuneler, her biri 22 devirden meydana gelen toplam 16 periyotluk aşınma testine tabi tutulmuş ve numunelerin, deney sonundaki kütle ve hacimsel aşınma kayıpları belirlenmiştir. Şekil

9’da Böhme cihazı ile aşındırma işlemi görülmektedir [20].

Hamur ve harç numunelerinin mikro yapılarının incelenmesi için Scanning Electron Microscope (SEM) taraması yapılmıştır. Hazırlanan yaklaşık 0,5-1 cm boyutlu numunelerin iletkenliğinin sağlanabilmesi için altın kaplama yapılmıştır. Çimentonun ve çimento+katkı maddelerinin su ile teması neticesi meydana gelen kimyasal reaksiyonu ve alkali-agrega reaksiyonu sırasında mikro yapıdaki durumun incelenmesi için normal sertleşmiş hamurların 7 ve 28 gün; alkali-agrega testine tabi tutulmuş aynı bağlayıcıya sahip karışımların ise 120 gün Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilenlerinden alınan numunelerin iç yapıları SEM ile incelenmiştir. Şekil 10’da SEM cihazı verilmiştir.



Şekil 9. Böhme cihazı



Şekil 10. SEM cihazı

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Priz Süresi ve Hacimsel Genleşme

Priz süresi hacimsel genleşme sonuçları Çizelge 5’te verilmiştir. Çizelge 5’teki priz süreleri ve hacimsel genleşme değerleri incelendiğinde katkı maddelerinin çimentonun priz sürelerinde büyük miktarda artışa, hacimsel genleşmede ise azalmaya neden olduğu görülmüştür. Priz

sürelerinin artmasına neden olan en etken katkı maddesinin kolemanit olduğu söylenebilir. Saptanan bulgular, 21 nolu referansta verilen bulgularla örtüşmektedir [21]. Hacimsel genleşme değerleri standartlara uygundur. Katkıların çimentonun hacimsel genleşme değerini azaltmasının nedeni MgO oranının düşük olması ve reaksiyona girmeyen CaO oranını azaltması ile izah edilebilir.

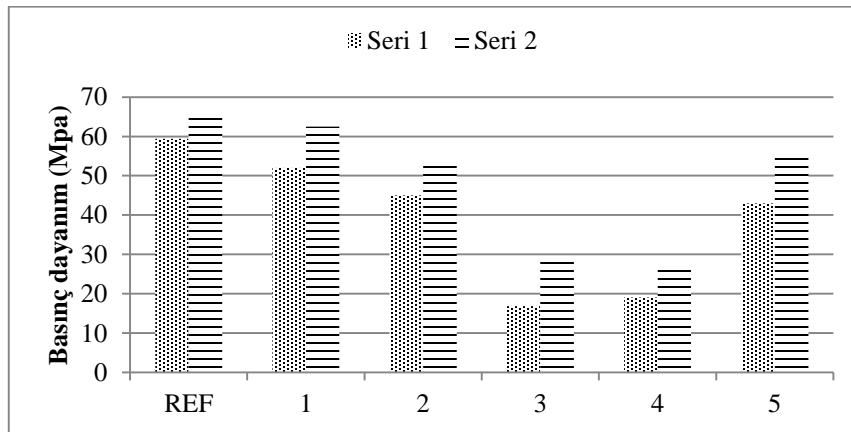
Çizelge 5. Priz süreleri

Numune	Priz süresi (dk)		Hacimsel genleşme (mm)
	Başlangıç	Sonu	
CEM I 42,5 REF	190	290	2,33
(CEMI ₆₀₊ KO ₅ +CT ₅ +KP ₁₀ +AEUK ₂₀)	350	510	1,5

3.2. Optimum Karışım Oranı

Karışıma giren optimum malzeme miktarlarını bulmak için hazırlanan 10 cm boyutlu deneme küp

numunelerinin ve referans numunenin basınç dayanımları Şekil 11’de görülmektedir.

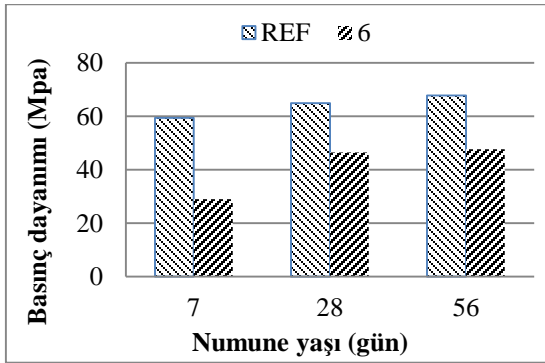


Şekil 11. 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımları

Şekil 11'deki basınç dayanımları incelendiğinde kolemanit oranı %10 olan 3. ve 4. grup numunelerin basınç dayanımları oldukça düşüktür. 3. ve 4. grup numunelerin kalıptan çıkarılma süreleri 4 günü bulmuş ve erken çıkan numunelerde dağılma gözlenmiştir. Her katkı malzemesinden %5 kullanarak elde edilen 1. grup karışımın 7 ve 28 günlük dayanımları referans numuneye yakın çıkmıştır. 5. grupta çimento %40 azaltılmış olmasına rağmen 28 günlük dayanım sonucu referans numunenin %90'ı mertebesinde çıkmıştır. Deneylerde kullanılan süper akışkanlaştırıcıyla referans numunede 7 ve 28 günlük dayanım birbirine yakın çıkmıştır. Yapılan bir çalışmada, farklı özelliklere sahip süper akışkanlaştırıcılardan erken yaşta mukavemet sağlayan katkı kullanıldığında 7 günlük basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının %98'ine kadar yaklaşmakta olduğu sonucuna varılmıştır [22].

3.3. Basınç Dayanımı

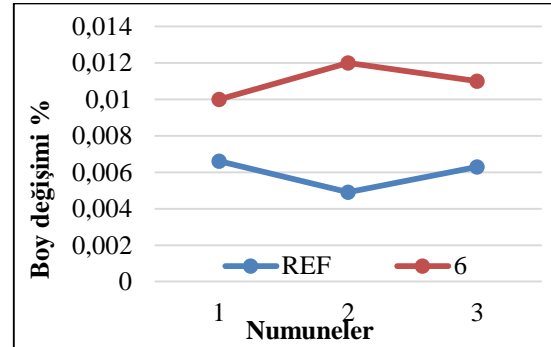
Referans ve 6 nolu numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. REF ve 6 nolu numunelerin basınç dayanımları

Şekil 12'de REF ve 6 nolu numunelerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde referans numunesinin basınç dayanımının C40 beton sınıfını sağladığı görülmektedir. 6 nolu karışım numunesinde ise 28 günlük basınç dayanımı değeri C40'ın yaklaşık %15 altında kalmıştır. Referans numuneye göre, 6 nolu karışımın yaşla dayanım gelişmesi daha

yüksek çıkmıştır. Örneğin 6 nolu numunenin 7 günlük dayanımı ile 56 günlük dayanımı arasındaki fark incelendiğinde, 56 günde %64 artış meydana geldiği görülmektedir. Katkı maddelerinin 6 nolu numunenin ilk yaşlardaki basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir. Bunda kolemanit ve diğer puzolanik maddelerin etkisinin olduğu referanslarca doğrulanmaktadır [21]. Yapılan araştırmada cam tozunun mekanik özelliklere reaktif olması nedeniyle olumlu etkide bulunduğu belirtilmiştir [23]. Araştırmamızda cam tozu tek başına kullanılmadığı için etkisi belirlenememiştir. Hızlandırılmış alkali-silika reaksiyonu deneyine ilişkin 14 günlük boy değişim oranları Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Alkali-silika reaksiyonu ile boy değişimi

Şekil 13'te alkali-silika reaksiyonu testi neticesi bulunan boy değişim oranları incelendiğinde değerlerin çok düşük olduğu görülmektedir. ASTM C1293-08b standardına göre boy değişimi %0,1'den küçük ise agrega zararsız olarak tanımlanmaktadır. Sonuçların ASTM C 1260 standardına göre 14 günlük boy değişiminin maksimum sınırının altında kaldığı görülmüştür. Yine Şekil 10'dan 6 nolu karışım numunesinin boy değişiminin REF numunesine göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak karışım numunesindeki alkalilerin (Na_2O ve K_2O) oranının referans numunesinden daha fazla olması gösterilebilir. Alkali-silika reaksiyonu, genellikle çimentodan kaynaklanan alkali (Na_2O ve K_2O) reaktif silika formları içeren agregalar arasında oluşan ve betonda genleşme etkisine sebep olan kimyasal bir reaksiyondur [24]. Araştırmada alkali-silika reaksiyonu sonucu bulunan değerler referans tarafından doğrulanmaktadır.

3.4. Kılcal Su Emme ve Donma Çözülme

Çalışmada REF ve 6 nolu numuneler üzerinde kılcal su emme ve donma/çözülme işlemi sonrası basınç dayanımı kayıpları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6'da görüldüğü gibi referans numunesine göre 6 nolu katkılı numunede bulunan ortalama

kılcal su emme katsayısı ve donma/çözülme sonrası basınç dayanımı kaybı sırasıyla %25 ve %14 daha düşük bulunmuştur. Bunun anlamı 6 nolu numune daha az geçirimli ve donma/çözülme olayından daha az etkilenmektedir. Bunun gerekçesi, mineral katkıların incelikleri ve reaksiyona girmeyen CaO ile reaksiyona girmeleri şeklinde açıklanabilir.

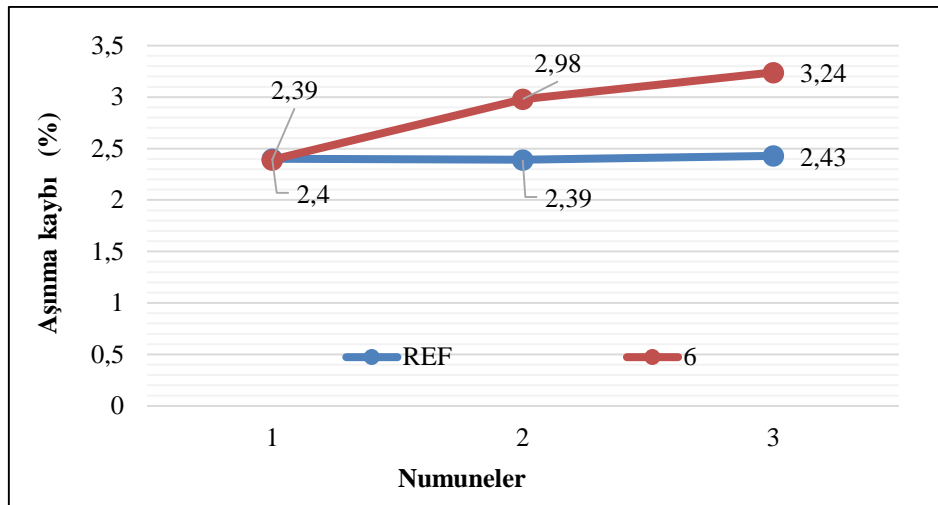
Çizelge 6. Numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları

Numune	Ortalama kılcal su emme (g)	Ortalama kılcal su emme katsayısı (cm ² /s) (kc)	Ortalama donma/çözülme kaybı (%)
REF	14,24	4,7*10 ⁻⁶	15,92
6	11,14	3,5*10 ⁻⁶	13,68

3.5. Mekanik Aşınma Kaybı

Böhme yöntemiyle bulunan aşınma kayıpları Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'teki örneklerin aşınma kayıpları incelendiğinde katkılı numunelerinin aşınma kayıplarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bağıntıdaki

formülde referans ve katkılı numunelerindeki hacimsel kayıplar sırasıyla 8570 mm³/5000 mm² ve 10660 mm³/5000 mm²'dir. Her iki değer de TS EN 1338 standardında yer alan ≤18000 mm³/5000 mm² değerini sağladığından sorun teşkil etmemektedir.

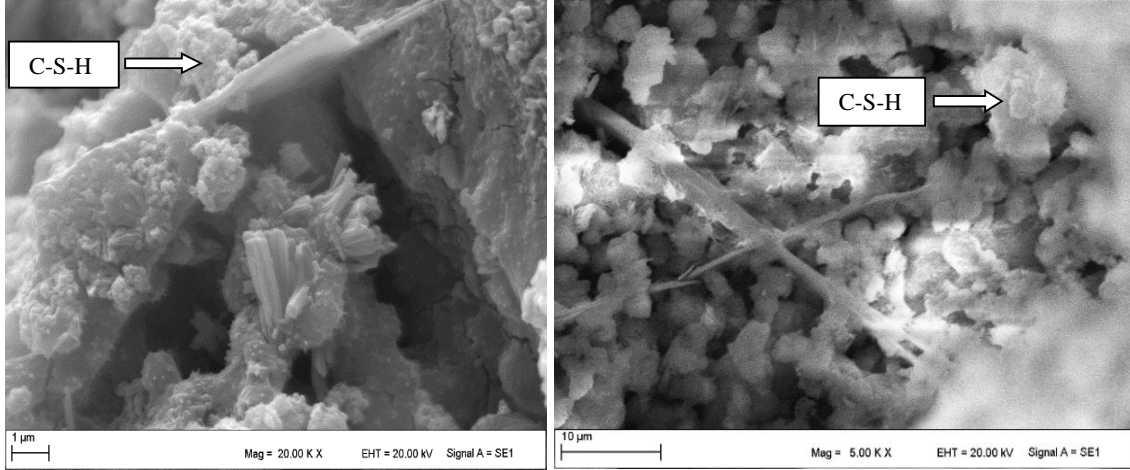


Şekil 14. 28 Günlük betonların mekanik aşınma kayıpları

3.6. Mikro Yapı

Çimentonun ve çimento+katkı maddelerinin su ile teması neticesi meydana gelen kimyasal reaksiyonu ve alkali-agrega reaksiyonu sırasında mikro yapıdaki durumun incelenmesi için normal sertleşmiş hamurların 7 ve 28 gün; alkali-agrega

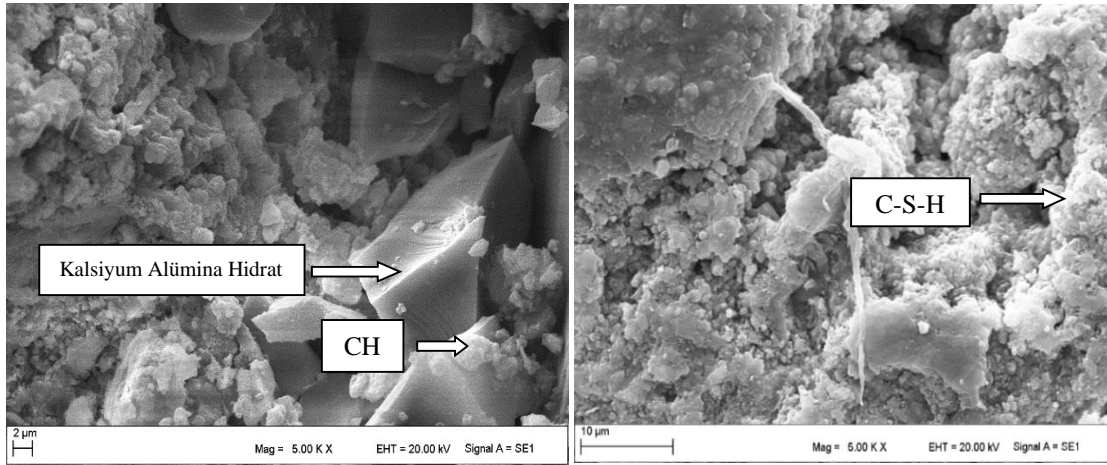
testine tabi tutulmuş aynı bağlayıcıya sahip karışımların ise 120 gün Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinde bekletilenlerinden alınan numunelerin iç yapıları SEM ile incelenmiştir. SEM resimleri Şekil 15, 16, 17, 18'de görülmektedir.



Şekil 15. REF numunelerinin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 15'te REF numunesinin bağlayıcı maddesi olan CEM I 42,5R çimentosuna ait sertleşmiş 7 ve 28 günlük hamurların SEM resimleri incelendiğinde beklediği gibi reaksiyon

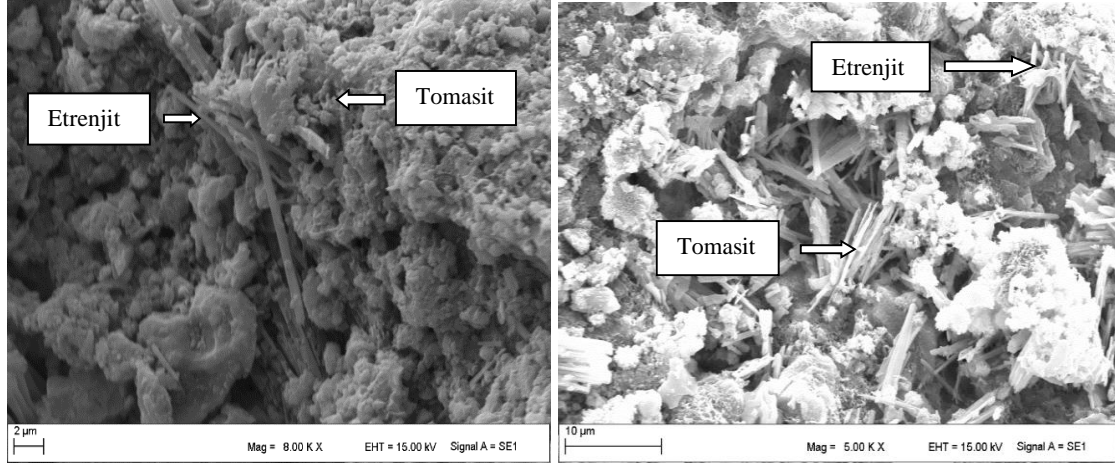
bileşiklerinin meydana geldiği görülmektedir. 28 günlük hamur görüntüsünde 7 güne göre C-S-H oranının arttığı CH oranının azaldığı görülmektedir.



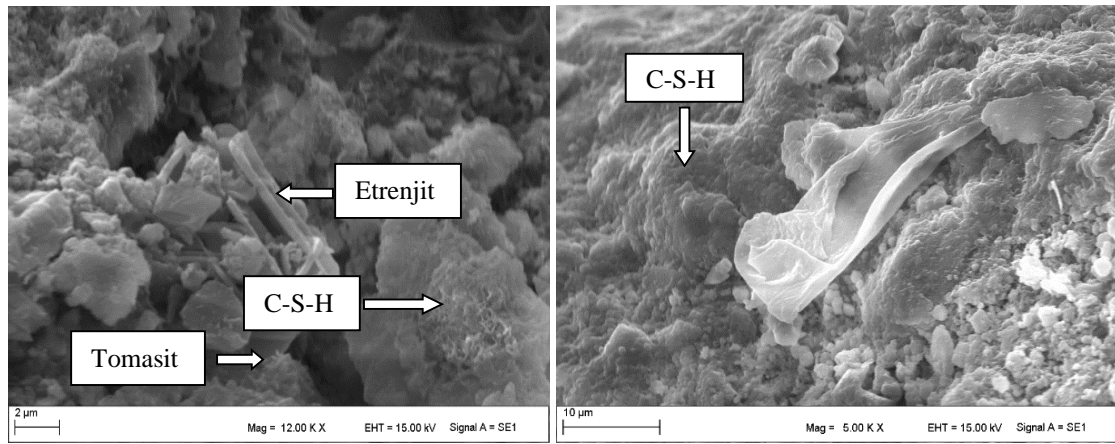
Şekil 16. 6 nolu numunelerin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 16'da verilen 6 nolu katkı numunesinin bağlayıcı maddelerinin 7 ve 28 günlük sertleşmiş hamurlarının SEM resimlerinden reaksiyonun meydana geldiği görülmektedir. 7 günlük numunede 28 güne göre daha fazla oranda CH, etrenjit ve kalsiyum alümina hidratların olduğu görülmektedir. 28 günlük numunede ise C-S-H jeli oranı artmıştır.

Şekil 17'de 120 gün Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen referans harç prizmasından alınan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde her iki çözeltide de etrenjitin arttığı tomasit meydana geldiği görülmektedir. Tomasitin beton üzerindeki davranışları bazı kaynaklarla araştırılmıştır [25-27]. Etrenjit ve tomasit oranı MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunede daha fazla meydana gelmiştir.



Şekil 17. 120 gün Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen R numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 18. 120 gün Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen 6 nolu numunenin SEM görüntüleri

Şekil 18'de 120 gün Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen 6 nolu harç prizmasından alınan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiş numunede etrenjit ve tomasit ve boşlukların daha fazla olduğu görülmektedir. MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunede ise daha yoğun C-S-H jeli meydana geldiği görülmektedir. Bu duruma göre 6 nolu numunenin MgSO_4 içeren ortamlara karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Sülfatların kalsiyum silikatlar (C-S-H) üzerine etkimesi sonucu oluşan ve 15 molekül su içeren tomasit tuzu da genişerek ve özellikle betonu yumuşatarak hasar yapar [24]. Bulgular referans tarafından doğrulanmaktadır.

4. SONUÇLAR

Uçucu külün kimyasal yapısının uygun hale getirilmesi ile reaksiyona girmeyen CaO oranı azaltılmış, C-S-H oranı artmış ve etrenjit miktarı azaltılmıştır.

AEUK'nın %20 oranında betona katılması ideal bir çözüm olarak görülmektedir. Çimentonun ikamesi olarak kolemanitin %5'ten fazla kullanılmasının beton prizini engellediği ve basınç dayanımına olumlu katkı sağlamadığı düşünülebilir. Cam tozunun basınç dayanımına olumlu katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Kayseri pomzasının kimyasal içeriği uygun olmasına

karşın özgül ağırlığı düşük olması nedeniyle AEUK ile birlikte kullanılması yüksek mukavemetli beton üretiminde önerilmemektedir.

Elde edilen mineral katkının priz süresini uzattığı görülmüştür. Katkılı çimento hamurunun genleşmesi ile ilgili standart bakımından sorun teşkil etmemektedir. Priz süresinin uzaması nedeniyle kütle betonu için önerilebilir.

- ✓ Alkali-Silika reaksiyonu incelendiğinde referans numuneye göre karışım numunesinin boy değişiminin arttığı gözlenmiştir.
- ✓ Karışım numunesinin standart değeri sağlmasına rağmen referans numuneden daha fazla aşındığı gözlemlenmiştir.
- ✓ 28 günlük mikro yapı incelendiğinde katkı malzemelerinin zararlı etrenjit oluşumunu önlemede katkı sağladığı düşünülebilir.
- ✓ Atık camların öğütülüp betonda puzolanik katkı olarak kullanımı çimento kullanımını azaltacağı için, çimento üretim tesislerinden kaynaklanan karbondioksit gibi sera gazlarının yayılmasını %10-15 oranında azaltacaktır.
- ✓ Ancak, dayanıklılık araştırması için 120 gün kısa bir süre olarak kabul edilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. İklim Haber, 2020, 2019'da Elektrik Üretimi Azaldı: Kömür Hala Birinci Kaynak, <https://www.iklimhaber.org/2019da-elektrik-uretimi-azaldi-komur-hala-birinci-kaynak/>, (Erişim zamanı: 23 Şubat, 2020).
2. Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 2004. Her Yönüyle Beton. Hazır Beton Birliği, İstanbul, 128.
3. Erdoğan, T.Y., 2010. Beton. ODTU Yayıncılık, Ankara, 760.
4. Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 193-203.
5. Temiz, H., Binici, H., Coşkun, İ., 2010. Volkanik Cüruf İlave Edilmiş Uçucu Kül Katkılı Betonların Özellikleri. Hazır Beton Dergisi, 97, 75- 82.
6. Tulga, İ., Kılınç, K., 2018. Uçucu Kül Kullanımının Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Kırklareli Üniversitesi Journal of Engineering and Science Dergisi, 4(2), 212-236.
7. Klemczak, B., M. Batog., Z., Giergiczny, A., Zmij, 2018. Complex Effect of Concrete Composition on The Thermo-mechanical Behaviour of Mass Concrete. Journal of Materials (Basel), 11(11), 1-18.
8. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2007. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. AR-GE Enstitüsü, Ankara, 114.
9. Temiz, H., Akçakale, A.H., 2014. Hafif Agregalı Betonun Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 7-20.
10. Gündüz, L., Saruşık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O., 1998. Pomza Teknolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 275-285.
11. Uluköy, A., Can, A.Ç., 2006. Çeliklerin Borlanması. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 189-198.
12. Aladdine, F., Laldji, S. And Tagnit-Hamou, A., 2009. Glass Powder as an Alternative Cementitious Material in Concrete. in: 10th ACI Int. Conf. Recent Advances in Concrete Technologies and Sustainability Issues, Seville, Espagne, 683-698.
13. Uzun, M., Çöğürücü, M.T., Keskin, Ü.S., 2018. Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi. Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 42-51.
14. TS 802, 2009. Beton Karışım Hesabı, Ankara.
15. TS EN 12620, 2003. Beton Agregaları, Ankara.
16. TS EN 196-3, 2002. Çimentonun Priz Süresi ve Genleşmesi, Ankara.
17. TS EN 12390-2, 2019. Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabii Tutulması, Ankara.

18. ASTM C1293-08b, 2008. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. PA, USA.
19. TS EN 772-11, 2011. Betondan, Yapay Taş ve Doğal Taştan Yapılmış Kagir Birimlerde Kapiler Etki ile (Kılcal) Su Emme Katsayısı ve Kil Kagir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini, Ankara.
20. TS EN 1338, 2005. Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deneysel Metotları, Ankara.
21. Bideci, Ö.S. ve Bideci, A., 2018. Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1), 133-138.
22. Çorbacıoğlu, C.U., 2008. Beton Karışım Tasarımının Geçirimsizliğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 90.
23. Uzun, M., Çöğürçü, M.T., Keskin, Ü.S., 2018. Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi. Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 42-51.
24. Baradan, B., Aydın, S., 2013. Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Hazır Beton Dergisi, 120, 54-68.
25. Ashraf, H.M. Abdalkader, 2014. Thaumasite Sulfate Attack in Cement Mortars Exposed to Sulfate and Chloride and Implications to Rebar Corrosion. PhD Thesis, The University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering, Sheffield, 232.
26. Mingyu, H., Fumei, L., Mingshu, T., 2006. The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Concrete of Yonggan Dam, Cement and Concrete Research, 36(10), 2006-2008.
27. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 318.

Flow and Mechanical Characteristics of a Modified Naca Wing Geometry

Mustafa Murat YAVUZ*¹

¹İzmir Democracy University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, İzmir

Geliş tarihi: 09.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

The flying ability is directly related to the structure of the wing geometry. The wing structure is designed differently according to each working conditions. In this study, a free-formed airfoil section was designed and the behaviour of the model under the influence of flow was investigated in terms of diving and take-off angles. Computational fluid dynamics method was used in the analysis. The sensitivity of the method was checked by comparing the solution of a NACA airfoil section with the experimental results in the literature and its usability in the study was accepted. Also, in the study, the wing geometry was modelled as 3D and layered, and its mechanical properties were examined. The designed airfoil has more dominant flow structure in the lift direction. Non-symmetrical airfoil causes unsymmetrical Cl-Cd distribution. As a result of the wing structure being more dominant in lift, it was observed that the deformation and stress results of the positive angle of attack were higher than the negative results. Depending on the angle of attack, the pressure and flow effects on the wing caused a higher bending-torsion effect and increased the stresses in the fixation region of the wing. The lowest deformation and average stresses occurred at -4° angle of attack. The results are discussed as a result of flow and mechanical findings.

Keywords: Angle of attack, CFD, Deformation, Structural analysis

Değiştirilmiş Bir Naca Kanat Geometrisinin Akış ve Mekanik Özellikleri

Öz

Uçma yeteneği doğrudan kanat geometrisinin yapısı ile ilgilidir. Kanat yapısı her çalışma koşuluna göre farklı tasarlanmaktadır. Bu çalışmada, serbest biçimli bir kanat profili kesiti tasarlanmış ve modelin akış etkisi altındaki davranışı dalış ve kalkış açıları açısından incelenmiştir. Analizde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin duyarlılığı, bir NACA kanat profili kesitinin çözümü literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak kontrol edilmiş ve çalışmada kullanılabilirliği kabul edilmiştir. Ayrıca çalışmada kanat geometrisi 3 boyutlu ve katmanlı olarak modellenmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Tasarlanan kanat profili, kaldırma yönünde daha baskın akış yapısına sahiptir. Simetrik olmayan kanat profili, simetrik olmayan Cl-Cd dağılımına neden olur. Kanat yapısının kaldırma yönünde daha baskın olması sonucunda, pozitif hücum açısının deformasyon ve gerilme sonuçları negatif sonuçlara göre daha fazla olduğu gözlemlendi. Hücum açısına bağlı olarak kanat üzerindeki basınç ve akış etkileri daha yüksek eğilme-burulma etkisine neden olmuş ve kanadın sabitleme bölgesinde gerilmeleri arttırmıştır. En düşük deformasyon ve ortalama gerilmeler -4° hücum açısında meydana gelmiştir. Sonuçlar akış ve mekanik bulgular neticesinde tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hücum açısı, HAD, Deformasyon, Yapısal analiz

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mustafa Murat YAVUZ, murat.yavuz@idu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Wings are the main component of aircraft, and the lifting property is one of the critical design parameters for them. There are a wide variety of wing types, and each wing design exhibits its unique flow behaviour, and their flight performance is different. That is why it's constantly being developed. The wings are operated in complex working conditions that includes aerodynamic, aeroelastic and body forces. Different wings are designed for providing optimum requirements and most of them are classified with NACA airfoil structure. Air and water channel flow experiment and computational fluid dynamics (CFD) are widely used for the designing process. In literature, some modified wing sections and NACA airfoil wing flow characteristic studies are available. A 2D NACA 0012 wing section is [1] investigated by using CFD and effect of angle of attack is searched between 0° and 40° . Flow separations and transition are captured, and vortex shedding are observed. Another NACA 0012 wing study [2] includes design modifications to increase lift-drag ratio by using CFD. A validation study is initially applied, and flaps and slots are included with different angles or locations. A NACA 0012 flapped airfoil [3] is considered with the effect of hinge position and suction effect. Shear stress transport $k-\omega$ turbulence model is used in the analysis. The usage of perpendicular suction and the movement of hinge position to trailing edge of the airfoil increase the lift coefficient. Kadhem and Hussein [4] investigate piezoelectric active suppressions to decrease vibrations and flutter of composite NACA 0012 wing airfoil which includes two different composites; glass-fiber random matt and woven (0/90 orientation) glass-fiber. Perpendicular and tangential suction increase lift-drag ratio 35.8% and 25.1% higher than the case without suction and lift coefficient increases when hinge come closer to trailing edge of the airfoil. Composite woven wing has better resistance performance than other composite random wing. More studies on NACA 0012 like shape optimization [5], the effect of porosity on the performance [6] and transonic flutter behaviour of aeroelastic model [7] are available. Yan [8]

studies on dynamic flutter derivatives rather than static ones to predict wing flutter speed of NACA 0010, 0012, 0014 and 0018 aerofoils by using aeroelastic stiffness and damping equation. Wings have a wingspan of 0.36 m, a chord length of 0.16 m and an aspect ratio of 4.5. C_l and C_m dynamic values are 10%-40% higher than static ones for all models. Aerodynamic coefficients boundary layer of a 2D NACA 43013 airfoil [9] is investigated under incompressible viscous flow by using ANSYS Fluent software. The results are compared with suitable data and compatible results have been achieved. Another wing type; NACA 4412 airfoil [10] is designed with aerodynamic coefficients by using CFD. Flow separation and reattach region of flow are considered in the study. A leading-edge modification to NACA 4412 wing [11] is applied for increasing aerodynamic performance. When leading-edge is designed with curved shape rather than rectangular, flow performance has been increased. Flutter behaviour and dynamic instability of NACA 4412 wing section [12] is investigated by using numerical methods. The study results are validated by a compared experimental result and critical flutter speed is determined. Gore et al. [13] investigate NACA 4412 aerofoil under various angle of attack (0, 8, 16, 20, 25, 27 degrees) at a constant Mach number of 0.6 that maximum lift has been achieved at angle of attack of 25° and it is larger than drag forces. A NACA 0015 wing has been [14] investigated with semi-span aspect ratios of 2, 3 and 4 that changes unsteady lift behaviour directly. Cavitating turbulent flow [15] around a NACA 16012 wing is investigated by using large eddy simulation (LES) that provides the vortices to be seen easily. Pressure coefficient increases under the effect of the horseshoe vortex at downstream. Aerodynamic performance [16] is investigated by using CFD for a NACA 23012 wing. A validation case is prepared and compared with a suitable wind tunnel test result. Stagnation points are determined for putting a stall warning device. Effect of angle of attack [17] on lift, drag and pressure distribution is researched for a NACA 4415 wing which has a chord length of 200 mm, span of length 450 mm and leading edge radius of 4.96 mm. Flow separation is detected at low angle of attack from -6° to 0° and full separation is

observed at high angle of attack from 12° to 18° at different speeds. Delaying and controlling the flow separation over NACA 2415 airfoil [18] are investigated to find the best slot location. The location at 0.3 to 0.6 of the airfoil chord length is the most effective slot locations for applying suction and stall angle is increased from 10° to 16° by applying slot modification. Flutter is an important phenomenon and affect aeroelastic stability which includes aerodynamic, elastic and inertial forces and Eken [19] uses thin walled composite beam theory to investigate three different NACA 4-digit-series (NACA 0009, NACA 0015, NACA 0021). The lowest frequency is found at NACA 0021 and the highest is found at NACA 0009 wing. The frequency can be modified if composite structures are used. Viglietti et al. [20] investigate variable angle-tow composites to improve dynamic behaviour of simple beam and complex wing structures. Fibre paths can be used to prevent undesired effects of bending and torsion frequencies. Wang et al. [21] investigated a single NACA airfoil aerodynamic excitation induced forced response. The study shows that the vibration depends on both central frequency of excitation and Reynold number. Bogrekci et al. [22] investigate structural and modal properties of NACA 66-206 wing section under lift and weight forces by using Ansys Workbench static structural and modal analysis tools. Aluminium 6061, carbon fiber and strong unidirectional epoxy glass are selected as wing materials and three different motion velocities 10, 50 and 100 m/s are considered. The maximum values of deformation are 2.28 mm for aluminium, 0.16 mm for carbon fiber and 7.71 mm for epoxy glass at the highest velocity. Carbon fiber material is better than aluminium and epoxy glass with respect to high natural frequency values and the lowest weight force. Kulshreshtha et al. [23] compared lift and drag coefficient of NACA 2412, 2414 and 2415 sections at different angle of attack for constant air velocity by using CFD. Aerodynamic analysis [24] was carried out for the NACA 2412 airfoil section aircraft wing. Pressure and velocity contours were given as flow results, and the stresses on the wing as a result of their effects are shown. In the study of aeroelastic behaviour, different wing and conditions were tried to be optimized. The

researchers [25-26] who examined the aeroelastic behaviour of a seamless wing by considering different camber sections, determined the appropriate design criteria. Newman et al. [27] studied the aeroelastic behaviour of a wing geometry under subsonic and supersonic flow conditions. While the unstructured Euler model was created in flow condition, it was used in less element models with structural mesh in the finite element model. Alyaak and Pendleton [28] created a finite element model of the tailless lambda wing and studied its aeroelasticity and determined the optimum conditions considering the wing's weight. Hou and Satyanarayana [29] prepared a remeshing option to be used in the structural and numerical analysis of the aircraft wing under the influence of flow and facilitated the tracking of deformation. Reich et al. [30] optimize structural structure of embedded antenna of a joined wing sensorcraft using control surface analyses. Zink et al. [31] investigated the aeroelastic response of a flexible wing by including inaccuracies in aerodynamic loads and redesigned the wing for this condition. Unlike linear loading, a slightly heavier but structurally stronger airfoil was achieved in designs. Guo [32] optimized a wing's weight and aeroelastic response together and was able to achieve similar aeroelastic behaviour with 40% less weight without the use of reinforcements. Stanford [33] studied the aeroservoelastic response of one edge of the wings prepared with various camber shapes and focused on minimizing weight while avoiding buckling, hinge moments, flutter. Szollosi and Baranyi [34] examined the control performance for a 2D airfoil with 3 degrees of freedom and provided performance improvement by using different models in their parametric analysis. Apart from this classification, different wing models are examined. In this study, an airfoil section that is not classified NACA type is designed and its aerodynamic and aeroelastic properties are investigated.

2. COMPUTATIONAL METHOD AND MODELLING

Computer-aided numerical methods were used to examine the properties of the NACA airfoil

profile. The CFD method was used to examine the flow conditions and the FEM method to examine the mechanical properties. Before examining the designed airfoil, a NACA 0012 model whose results are available in the literature was examined to determine the accuracy of the analyses. 2D NACA 0012 airfoil model prepared for CFD analysis is shown in Figure 1. In the study using air as fluid, the angle of attack was taken as 0° and the Reynolds number was determined to be 6,000,000. Sparlat-Allmaras turbulence model has been used due to its smooth and symmetrical airfoil shape. In the same conditions, while the friction coefficient was 0.006 in the literature study [35], it was obtained as 0.00642 in this study.

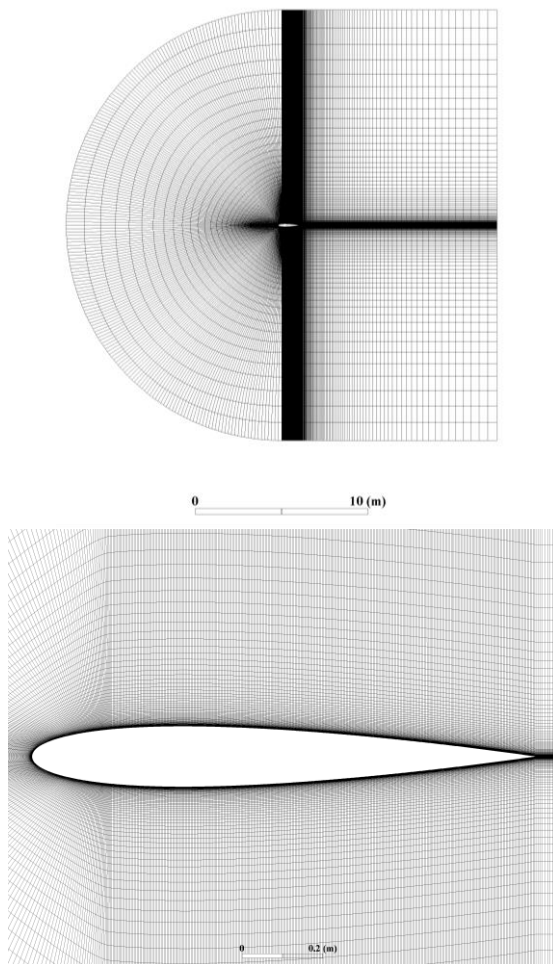


Figure 1. CFD domain of 2D NACA 0012 model

The specially created new NACA airfoil profile is shown in Figure 2. In addition to the 2D cross section geometry model, 3D wing model was created. Point coordinates of the airfoil geometry in the plane are available in appendix. For the airfoil geometry, 2D flow analysis was performed and the flow characteristics around the airfoil was visualized. In addition, a 3D wing model consisting of two nested layers was examined under flow conditions and flow properties (velocity and pressure effects) were obtained for mechanical analysis. Afterwards, 2-layer materials were defined for the mechanical solution and static analysis was performed. The wing root is defined as a fixed support. The profile on the inside (W_{in}) is defined as epoxy e-glass ud and the profile on the outside (W_{out}) as epoxy carbon woven (230 GPa) prepreg. Wing sections are 2 mm thick. Material properties are shown in table 1. ρ is the density, E is the modulus of elasticity and ν is the Poisson ratio of the materials. Gravitational effects are neglected.

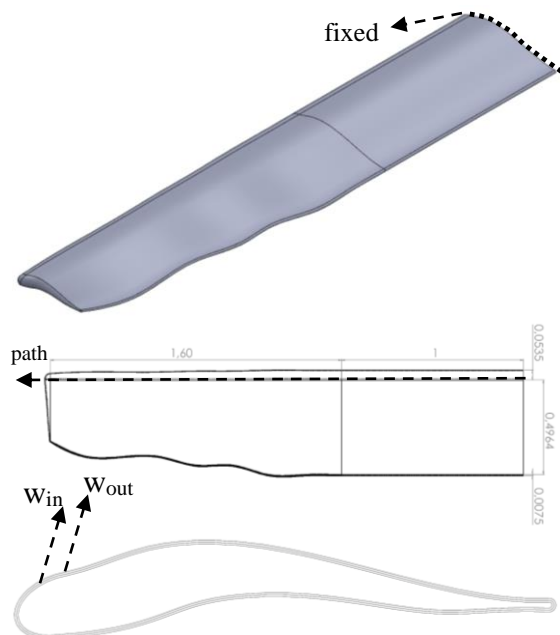


Figure 2. Isometric view of 3D model of airfoil and section view

The curved leading edge is created by using different cross-section dimensions in the direction

of the airfoil. In order to reduce the effect of weight at the airfoil tip and the resulting bending moment, the 3D airfoil has three airfoil profile reductions of 0.8, 0.8 and 0.7 times in 1.6 m, 2.0 m and 2.6 m dimensions, respectively. A similar model [36] is also found in the literature on curved and straight wing edge analysis.

Table 1. Used material properties in wing-cross sections

	Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	Epoxy E-Glass UD
ρ	1420 kg/m ³	2000 kg/m ³
E_x	61.34 GPa	45 GPa
E_y	61.34 GPa	10 GPa
E_z	6.9 GPa	10 GPa
ν_{xy}	0.04	0.3
ν_{yz}	0.3	0.4
ν_{xz}	0.3	0.3

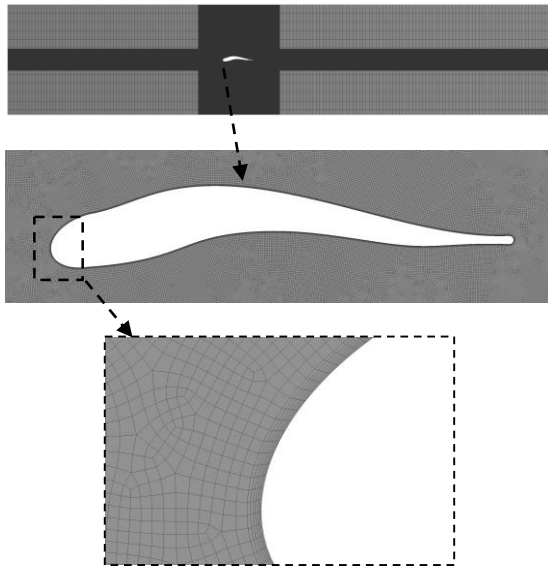


Figure 3. CFD domain and applied boundary conditions

A 2D CFD model was created to observe the flow behaviour and is shown in Figure 3. In the model, a layered grid model was created for the wing surface. A magnified view has also been added to show the grid structure around the wing. Standard properties of water were used as fluid

(density=998.2 kg/m³, viscosity=0.001003 kg/ms) and flow solution was made for Reynolds number 10000. K-epsilon turbulence model was used to solve the partial derivatives in momentum eq'n, which is widely used CFD model. The continuity and momentum (Navier-Stokes) equation [37] for the solution structure are shown below;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{x_i x_j}) \tag{2}$$

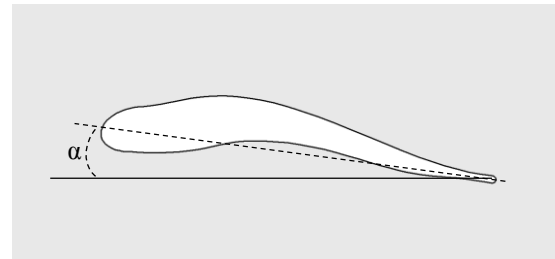


Figure 4. The angle of attack (α) on the airfoil

The angle of attack formed between the wing centerline passing through the wing tips and the horizontal plane was shown in Figure 4.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The pressure results around the airfoil are shown in Figure 5 for different angles of attack. The pressure results are widely given in literature [38-39] and provide important information for lifting and drag behaviour. The freely modelled airfoil geometry is non-symmetrical, resulting in a notable difference in pressure locations. At -8° of attack angle, the upper surface of the airfoil front appears to be the high-pressure area and the lower surface as the lowest pressure area. This pressure profile has a positive effect on the diving condition of the airfoil. In the rest of the lower surface of the airfoil, the pressure is stagnant, and the effect is low. There is a low-pressure zone in the middle of the upper surface of the airfoil. This pressure zone will raise the airfoil evenly.

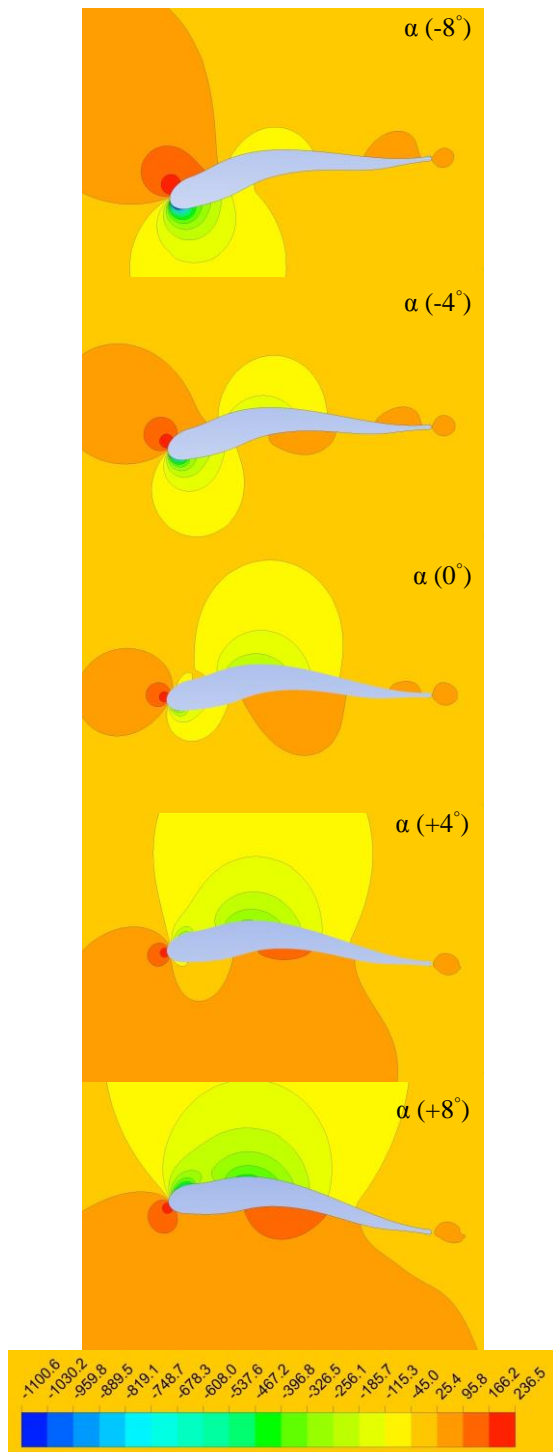


Figure 5. Pressure contours of wing profile under different angles of attack

In addition, the high pressure formed at the rear end of the upper surface is in a structure to reduce the excessive diving moment that may occur in the airfoil. Pressure profile at -4° is similar to -8° . However, positive and negative pressure values started to decrease. The negative pressure profile in the middle of the upper surface of the airfoil has started to grow. The moment structure that can turn the airfoil towards the dive direction is reduced. The high pressure on the upper surface of the airfoil tip at 0° has come right in front of the airfoil. The low-pressure profile under the airfoil tip is reduced. The negative pressure region formed in the middle of the upper surface of the airfoil has increased. The pressure distribution exhibited in the aircraft airfoil profiles was similarly obtained. At the angle of attack adjusted for $+4^\circ$ upward climb, the negative pressure under the airfoil disappeared and formed on the upper surface of the airfoil in a large area. A high-pressure profile has occurred under the airfoil. At $+8^\circ$, these pressure distribution values have grown. The low pressure on the upper surface of the airfoil has increased its effect. There was no dominant pressure difference on the upper and lower surfaces of the tail part of the airfoil. In this region, a flap should be designed on the tail part in order to benefit from airfoil climbing or diving situations.

The velocity profile formed around the airfoil is shown in Figure 6. The free-stream velocity, which does not interact with the airfoil surface, appears on the contours as 0.67 m/s. The distributions of the velocity profiles are inversely proportional to the pressure profiles. High velocity profile is seen in low pressure areas. In diving condition, there is a low velocity profile in the front upper surface of the airfoil and in the middle of the lower surface of the airfoil. As the angle of attack increased, the velocity profile on the upper surface of the airfoil began to accelerate. The velocity under the airfoil was lower than the free-stream velocity. A flow profile suitable for the airfoil characteristic is observed.

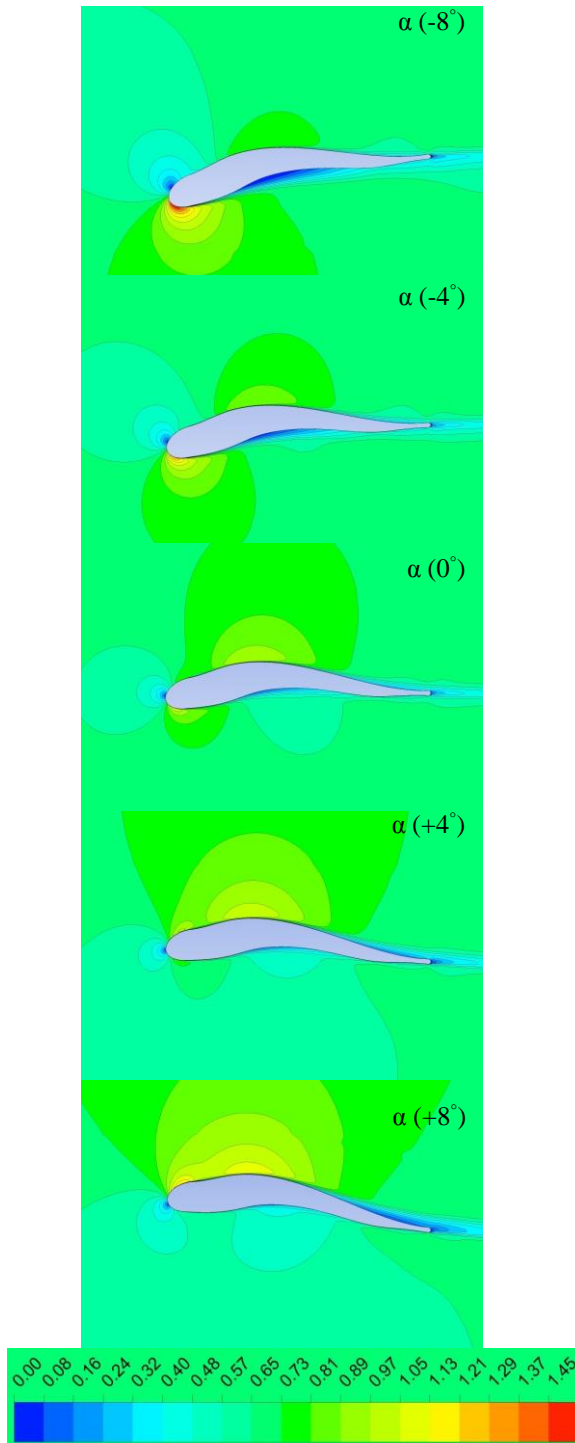


Figure 6. Velocity contours around the airfoil under different angle of attack

The variation of the lift coefficient with respect to the angle of attack where the airfoil is positioned relative to the free flow direction is shown in Figure 7. Accordingly, the drag coefficient is also given. A positive lift coefficient at 0° angle of attack indicates that the airfoil is more dominant in the lift direction. The lift coefficient was obtained as 0.65 at $+8^\circ$ angle of attack. In the lift-drag interaction, the best lift effect is obtained at the positive angle of attack and the best drag effect is obtained at the negative angle of attack (in the diving state). This is a desirable condition for both conditions. The fact that the airfoil is not symmetrical has created an unsymmetrical distribution in the C_l - C_d graph. A symmetrical distribution is more common in symmetrical wing profiles [35].

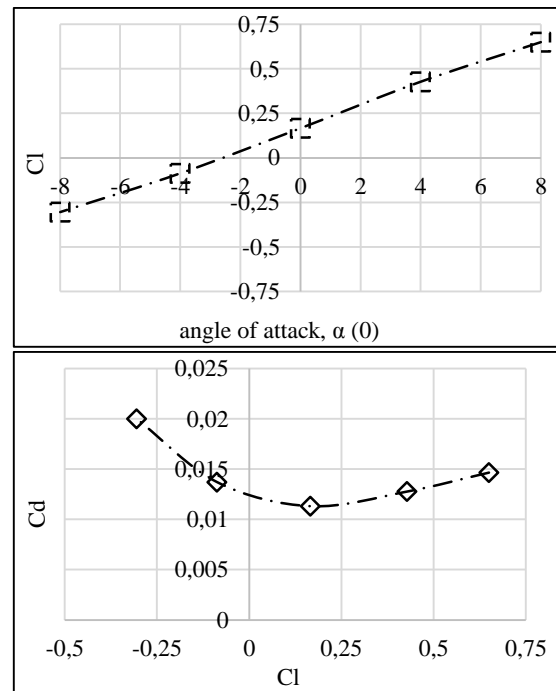


Figure 7. C_l vs angle of attack and C_d vs C_l graphs

The vertical deflections and stresses occurring in the wing are taken from a path defined at the wing tip edge against the flow. The unsymmetrical airfoil wing has a significant effect on vertical deflection and shown in Figure 8. The fact that the

fluid pressure created is not symmetrical and that the wing is in an angled position relative to the vertical-horizontal axis has affected the formation of vertical deflection. The highest deflection profile occurred when the angle of attack was $+8^\circ$. The deflection profile is upwards, and the deflection increase slows after 1.8 meters. $+4^\circ$ result has positive vertical deflection, and this deformation structure is in linear increase structure. When the angle of attack is 0° , there is very little vertical deflection in the upward direction. Vertical deflection is negligible as a result of -4° , where the wing attack angle becomes diving. There is a vertical deflection in the parabolic structure formed in the negative direction as a result of -8° . Here, when the results of $+4^\circ$ and -4° and $+8^\circ$ and -8° are compared with each other, it is seen that the wing exhibits a more dominant deformation behaviour in the upward direction. Negative deformation behaviour is less.

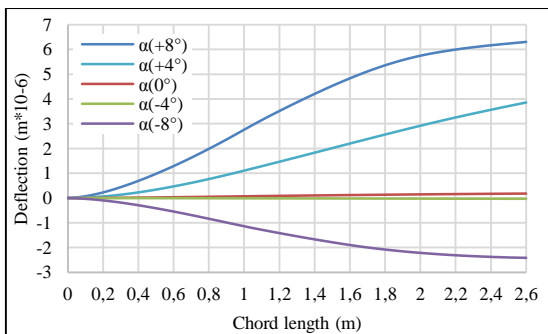


Figure 8. Vertical deflection of the wing

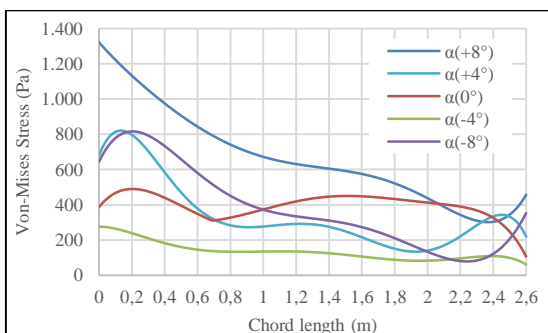


Figure 9. Stress formations at the wing front edge

The stresses occurring in the front of the wing are shown in Figure 9. At -4° angle of attack where the

deformation is the least, the stress values are the lowest and the sudden changes in the values are the least. The stress value is the highest as a result of $+8^\circ$, where the highest deformation occurs. Its values decrease towards the wing tip. At $+4^\circ$ and -8° results, the deformation values are similar and the highest stress values are almost the same. Although the deformation is very small at 0° angle of attack, the stresses are around 400 MPa and generally do not show a decreasing behaviour towards the wing tip. There is a sudden increase in the results of $+8^\circ$ and -8° at the wing tip. This behaviour is not observed in other attack angles.

4. CONCLUSION

In this study, a free form airfoil section, which is not found in the standards, was created and its flow and mechanical behaviour were investigated. Computer aided numerical analysis methods were used in the study. Considering the positive and negative angle of attack results for the wing in the study,

- The designed airfoil is non-symmetrical, resulting in a notable difference in pressure formations and unsymmetrical distribution is observed in the C_l - C_d graph.
- The high pressure on the upper surface of the airfoil tip has come right in front of the airfoil. The low-pressure profile under the airfoil tip is reduced at 0° and positive lift coefficient is observed which indicates that the airfoil has more dominant behaviour in the lift.
- At the angle of attack adjusted for $+4^\circ$ upward climb, the negative pressure under the airfoil disappeared and formed on the upper surface of the airfoil in a large area.
- The negative and positive pressure profiles formed on the upper and lower surfaces of the wing cover a smooth closed area. This allows especially low velocity profile to broadcast in this closed area.
- In the lift-drag interaction, the best lift effect is obtained at the positive angle of attack and the best drag effect is obtained at the negative angle of attack (in the diving state).
- The stress value is the highest as a result of $+8^\circ$, where the highest deformation occurs.

- Contrary to the vertical deformation in the wing, the fact that the stress behaviour does not exhibit a uniform distribution and a certain characteristic according to the angle of attack allows more examination in the geometric design.
- There was no dominant pressure difference on the upper and lower surfaces of the tail part of the airfoil. In this region, a flap should be designed on the tail part in order to benefit from airfoil climbing or diving situations.

5. REFERENCES

1. Zakaria, M.Y., Ibrahim, M.M., Ragab, S., Hajj, M.R., 2018. A Computational Study of Vortex Shedding from a NACA-0012 Airfoil at High Angles of Attack. *International Journal of Aerodynamics*, 6(1), 1-17.
2. Rao, T.S., Mahapatra, T., Mangavelli, S.C., 2018. Enhancement of Lift-drag Characteristics of NACA 0012. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5328-5337.
3. Fatahian, E., Nichkoohi, A.L., Salarian, H., Khaleghinia, J., 2020. Effects of the Hinge Position and Suction on Flow Separation and Aerodynamic Performance of the NACA 0012 Airfoil. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(86).
4. Kadhem, H.A., Hussein, A.A., 2019. The Effect of Wind Velocity on the Suppression of Composite Wing Airfoil NACA 0012. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 15(3), 38- 44.
5. Yu, Y., Lyu, Z., Xu, Z., Martins, J.R.R.A., 2018. On the Influence of Optimization Algorithm and Initial Design on Wing Aerodynamic Shape Optimization. *Aerospace Science and Technology*, 75, 183-199.
6. Hanna, Y.G.T., Spedding, G.R., Aerodynamic Performance Improvements Due to Porosity in Wings at Moderate Re. *AIAA Aviation 2019 Forum*, 17-21 June 2019, Dallas, Texas.
7. Stanford, B.K., Jacobson, K.E., Massey, S.J., Transonic Aeroelastic Modeling of the NACA 0012 Benchmark Wing. *AIAA Aviation 2020 Forum*, June 15-19, 2020, Virtual Event, Session: Aerodynamic-Structural Dynamics Interaction, AIAA, 2020-2716.
8. Yan, B.K., 2018. Flutter Analysis of a Flexibly Supported Wing. Doctor of Philosophy Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, January 2018.
9. Hasnaoui, M., Naamane, A., Akhmari, H., 2019. Asymptotic Modeling the Aerodynamic Coefficients of the NACA Airfoil. *Modelling, Measurement and Control B*, 88(2-4), 58-66.
10. Körpe, D.S., Kanat, Ö.Ö., Oktay, T., 2019. The Effects of Initial y plus: Numerical Analysis of 3D NACA 4412 Wing Using γ -Re θ SST Turbulence Model. *European Journal of Science and Technology*, 17, 692-702.
11. Kumar, B.R., 2019. Enhancing Aerodynamic Performance of NACA 4412 Aircraft Wing Using Leading Edge Modification. *Wind and Structures*, 29(4), 271-277.
12. Halima, Z., Djilali, B., 2018. Aeroelastic Analysis of an Aircraft Wing Type NACA 4412 with Reduced Scale. *International Journal of Modeling and Optimization*, 8(4), 241-245.
13. Gore, K., Gote, A., Govale, A., Kanawade, A., Humane, S., 2018. Aerodynamic Analysis of Aircraft Wings Using CFD. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(6), 639-644.
14. Gloutak, D.A., Farnsworth, J.A., 2020. Characteristic Wing Measurements of a NACA 0015 in Steady and Unsteady Surging Wind Tunnel Flow. *AIAA 2020-1558 Session: Special Session: Surging and Surging/Pitching Aerodynamics II*.
15. Movahedian, A., Pasandidehfarid, M., Roohi, E., 2019. LES Investigation of Sheet-Cloud Cavitation around a 3-D Twisted Wing with a NACA 16012 Hydrofoil. *Ocean Engineering*, 192(106547), 1-13.
16. Dent, J., Robson, J., Basso, A., Ellin, A., Prakash, A., Hamad, F., 2019. Computational Study of Aerodynamic Performance and Flow Structure Around NACA 23012 Wing. *International Journal of Aerodynamics (Accepted/In press)*
17. Ismail, N.A., Kaisan, M.U., Balogun, M.B., Abdullahi, M.B., Faru, F.T., Ibrahim, I.U., 2020. Effect of Angle of Attack on Lift, Drag, Pitching Moment and Pressure Distribution of NACA 4415 Wing. *Journal of Science Technology and Education*, 8(1), 31-44.

18. Fatahian, E., Nichkoohi, A.L., Fatahian, H., 2019. Numerical Study of the Effect of Suction at a Compressible and High Reynolds Number Flow to Control the Flow Separation Over NACA 2415 Airfoil. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 19(3), 170-179.
19. Eken, S., 2019. Free Vibration Analysis of Composite Aircraft Wings Modeled as Thin-Walled Beams with NACA Airfoil Sections. *Thin-Walled Structures*, 139, 362-371.
20. Viglietti, A., Zappino, E., Carrera, E., 2019. Free Vibration Analysis of Variable Angle-tow Composite Wing Structures. *Aerospace Science and Technology*, 92, 114-125.
21. Wang, A., Ouyang, H., Xie, H., Wu, Y., 2019. Experimental Investigation on a Single NACA Airfoil's Nonlinear Aeroelasticity in Wake Induced Vibrations. *Fluid Dynamics*, 54(4), 535-549.
22. Bogrekci, I., Demircioglu, P., Sucuoglu, H.S., Guven, E., Demir, N., Durakbasa, M.N., 2019. Structural and Modal Analyses of NACA 66-206 Aircraft Wing Model. *Proceedings of the International Symposium for Production Research*.
23. Kulshreshtha, A., Gupta, S.K., Singhal, P., 2020. FEM/CFD Analysis of Wings at Different Angle of Attack. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 1638-1643.
24. Triet, N.M., Viet, N.N., Thang, P.M., 2015. Aerodynamic Analysis of Aircraft Wing. *VNU Journal of Science: Mathematics-physics*, 31(2), 68-75.
25. Perera, M., He, Y., Guo, S., 2010. Structural and Dynamic Analysis of a Seamless Aeroelastic Wing. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 12 April 2010-15 April 2010, Orlando, Florida.
26. Perera, M., Guo, S., 2009. Optimal Design of an Aeroelastic Wing Structure with Seamless Control Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 223(8), 1141-1151.
27. Newman, J.C., Newman, P.A., Taylor, A.C., Hou, G.J.W., 1999. Efficient Nonlinear Static Aeroelastic Wing Analysis. *Computers & Fluids*, 28, 615-628.
28. Alyanak, E.J., Pendleton, E., 2014. A Design Study Employing Aeroelastic Tailoring and an Active Aeroelastic Wing Design Approach on a Tailless Lambda Wing Configuration, 15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 16-20 June 2014, Atlanta, GA.
29. Hou, G., Satyanarayana, A., 2000. Analytical Sensitivity Analysis of a Static Aeroelastic Wing. 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA, U.S.A. 2000.
30. Reich, G.W., Raveh, D.E., Zink, P.S., 2004. Application of Active-aeroelastic-wing Technology to a Joined-wing Sensorcraft. *Journal of Aircraft*, 41(3), 594-602.
31. Zink, P.S., Raveh, D.E., Mavris, D.N., 2004. Robust Structural Design of an Active Aeroelastic Wing with Maneuver Load Inaccuracies. *Journal of Aircraft*, 41(3), 585-593.
32. Guo, S., 2007. Aeroelastic Optimization of an Aerobatic Aircraft Wing Structure. *Aerospace Science and Technology*, 11, 396-404.
33. Stanford, B.K., 2016. Static and Dynamic Aeroelastic Tailoring with Variable-camber Control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 39(11), 2522-2534.
34. Szollosi, A., Baranyi, P., 2017. Improved Control Performance of the 3-Dof Aeroelastic Wing Section: A Tip Model Based 2d Parametric Control Performance Optimization. *Asian Journal of Control*, 19(2), 450-466.
35. Abbott, I.H., Von Doenhoff, A.E., 1959. *Theory of Wing Sections-including a Summary of Airfoil Data*, Dover Publications, New York.
36. Haque, M.N., Ali, M., Ara, I., 2015. Experimental Investigation on the Performance of NACA 4412 Aerofoil with Curved Leading Edge Planform. *Procedia Engineering*, 105, 232-240.
37. Yagmur, S., Dogan, S., Aksoy, M.H., Goktepli, I., 2020. Turbulence Modeling Approaches on Unsteady Flow Structures around a Semi-circular Cylinder. *Ocean Engineering*, 200, 107051.

38. McAlister, K.W., Takahashi, R.K., 1991. NACA 0015 Wing Pressure and Trailing Vortex Measurements, NASA Technical Paper 3151.
39. Rubel, R.I., Uddin, M.K., Islam, M.Z., Rokunuzzaman, M., 2017. Comparison of Aerodynamics Characteristics of NACA 0015 & NACA 4415 Aerofoil Blade. International Journal of Research-granthaalayah, 5(11), 187-197.

APPENDIX A

#	X	Y	#	X	Y	#	X	Y
1	0.249625515	0.00499355	41	-0.17454	0.054847	81	-0.11134	0.001335
2	0.23884796	0.004754103	42	-0.18484	0.051647	82	-0.10032	0.004053
3	0.228069021	0.004927897	43	-0.19504	0.048174	83	-0.08918	0.00619
4	0.21730251	0.005475955	44	-0.20521	0.044581	84	-0.07794	0.007822
5	0.206558323	0.006360593	45	-0.21538	0.04102	85	-0.06666	0.009037
6	0.195843064	0.007545964	46	-0.22562	0.037639	86	-0.05534	0.009887
7	0.185160653	0.008998341	47	-0.23596	0.034591	87	-0.044	0.010404
8	0.174512856	0.010686216	48	-0.24643	0.032039	88	-0.03265	0.010606
9	0.163899747	0.012580261	49	-0.25266	0.03077	89	-0.0213	0.010503
10	0.153320088	0.014653203	50	-0.25878	0.029013	90	-0.00995	0.010098
11	0.142771638	0.016879657	51	-0.26474	0.026789	91	0.001375	0.009392
12	0.132251398	0.019235922	52	-0.2705	0.024107	92	0.012684	0.008418
13	0.121755814	0.021699769	53	-0.27603	0.020965	93	0.023973	0.007224
14	0.111280926	0.024250233	54	-0.28126	0.017352	94	0.035241	0.005855
15	0.100822494	0.026867398	55	-0.28612	0.013245	95	0.046492	0.004348
16	0.090376092	0.029532207	56	-0.29048	0.008615	96	0.057729	0.002742
17	0.079937189	0.032226261	57	-0.29415	0.003432	97	0.068958	0.001075
18	0.069501215	0.034931644	58	-0.29687	-0.00231	98	0.080183	-0.00061
19	0.059063616	0.037630747	59	-0.29822	-0.00851	99	0.091412	-0.00227
20	0.048619908	0.0403061	60	-0.29771	-0.01482	100	0.102655	-0.00384
21	0.038165727	0.04294021	61	-0.29513	-0.0206	101	0.113921	-0.00523
22	0.027696888	0.04551541	62	-0.29086	-0.02528	102	0.125221	-0.00631
23	0.017209442	0.048013705	63	-0.28551	-0.0287	103	0.136551	-0.00698
24	0.006699748	0.050416625	64	-0.27959	-0.031	104	0.1479	-0.00723
25	-0.003835443	0.052705085	65	-0.27338	-0.03236	105	0.159249	-0.00706
26	-0.01439889	0.054859253	66	-0.26704	-0.03293	106	0.170591	-0.00659
27	-0.024992737	0.056858421	67	-0.26069	-0.03284	107	0.181925	-0.00597
28	-0.035618375	0.058680905	68	-0.25436	-0.03216	108	0.193261	-0.00538
29	-0.046276263	0.060303953	69	-0.24305	-0.03126	109	0.204603	-0.00491
30	-0.056965728	0.061703697	70	-0.23175	-0.03015	110	0.215951	-0.00464
31	-0.067684733	0.062855145	71	-0.22048	-0.02881	111	0.227302	-0.00457
32	-0.078429611	0.063732242	72	-0.20925	-0.02718	112	0.238653	-0.0047
33	-0.08919478	0.064308005	73	-0.19806	-0.02523	113	0.25	-0.00501
34	-0.09997244	0.064554777	74	-0.18695	-0.02292	114	0.25196	-0.00461
35	-0.110752284	0.064444594	75	-0.17593	-0.02019	115	0.253607	-0.00347
36	-0.121521244	0.063949713	76	-0.16503	-0.01703	116	0.254678	-0.00179
37	-0.132263307	0.063043288	77	-0.15425	-0.01346	117	0.255004	0.000187
38	-0.142959463	0.061700203	78	-0.14358	-0.00961	118	0.254532	0.002131
39	-0.153587817	0.059898022	79	-0.13293	-0.00568	119	0.253337	0.003734
40	-0.164123926	0.057618004	80	-0.12221	-0.00195	120	0.251609	0.004742

Estimation of the Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Sorptivity of Terraced Soil Using Four-Term Expansions of the Haverkamp Model

Deniz YILMAZ*¹

¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Tunceli

Geliş tarihi: 28.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Abstract

Uzunçayır water retention Dam is located in the Tunceli province. This semi-arid mountainous region in eastern Turkey is prone to erosion. To combat this phenomenon, terraces along the edge of the Munzur University campus were built on sloping ground with pine plantations. The objective is twofold, on the one hand to mitigate soil erosion and protect the dam from sediments deposits, and on the other hand to promote the infiltration of rainwater and the vegetation of the sloping soil. However, the so-called eco-functions of the terraces over the time are not proven. Monitoring the infiltration capacities of the terraces over time and space will allow a better understanding of their contribution to the hydrology of the watershed and their effect on soil erosion. The Beerkan infiltration technique offers simple and inexpensive experimental protocols. In addition, treatment methods are constantly improving. More recently, the four-term expansion of the implicit Haverkamp cumulative infiltration equation has been proposed. This complicated but robust formulation was used in this study to estimate the soil sorptivity S and saturated hydraulic conductivity K_s of terrace soil at Tunceli. The average K_s value of studied site was estimated to be 0.0852 mm/s with a standard deviation of 0.0112 mm/s. The soil sorptivity values were more extensive with mean value of 2.1227 mm/s^{0.5} and a standard deviation of 0.5855 mm/s^{0.5}. The fit of the model used was perfect, showing that fast and robust estimation of S and K_s are possible using the new model.

Keywords: Beerkan infiltration, Terrace soil, Inverse solution, Soil hydraulic properties

Haverkamp Modelin 4 Terimli Uzantısını Kullanılarak Teras Zeminin Doygun Hidrolik İletkenlik ve Sorptivite Tayini

Öz

Uzunçayır su tutma barajı Tunceli ilinde bulunmaktadır. Türkiye'nin doğusundaki bu yarı kurak dağlık bölge erozyona eğilimlidir. Bu fenomenle mücadele etmek için Munzur Üniversitesi kampüsü sınırlarına boyunca, eğimli yamaçlara teraslar inşa edilmiştir ve çam ağaçları dikilmiştir. Amaç iki yönlüdür, bir yandan toprak erozyonunu önlemek ve barajı sediment birikintilerinden korumak, diğer yandan yağmur suyunun sızmasını ve eğimli toprağın bitki örtüsünü teşvik etmektir. Ancak terasların zaman içindeki sözde eko-fonksiyonları kanıtlanamamıştır. Terasların zaman ve mekâna göre infiltrasyon kapasitelerinin

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Deniz YILMAZ, dyilmaz@munzur.edu.tr

izlenmesi, bunların havza hidrolojisine katkılarını ve toprak erozyonu üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Beerkan infiltrasyon tekniği basit ve ucuz deneysel protokoller sunar. Ayrıca, bu tür verilerin analiz yöntemleri sürekli olarak gelişmektedir. Son zamanlarda, Haverkamp'ın implicit kümülatif infiltrasyon denkleminin dört terimli uzantısı önerildi. Bu karmaşık fakat sağlam formülasyon, bu çalışmada Tunceli'deki teras toprağının zemin sorptivitesini ve doymuş hidrolik iletkenliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Çalışılan alanın ortalama K_s değeri 0,0112 mm/s ve standart sapma 0,0852 mm/s olarak tahmin edildi. Zeminin sorptivitesi S 2,1227 mm/s^{0.5} ortalama değeri ve 0,5855 mm/s^{0.5} standart sapması ile belirlenmiştir. Kullanılan modelin deneysel verileri ile uyumu mükemmeldi. Yeni model kullanılarak S ve K_s 'nin hızlı ve sağlam bir şekilde tahmin edilmesinin mümkün olduğunu gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Beerkan infiltrasyon, Teras zemin, Ters yöntem, Zemin hidrolik özellikleri

1. INTRODUCTION

Arid and semi-arid region are more prone to erosion phenomena due to the increase in heavy precipitations events [1]. Several studies on soil erosion in Turkey have observed these phenomena [2-4]. The terrace reduces kinetic energy of runoff water and promote the infiltration into the soil [5] and thus reduce the soil erosion. Greening application on terrace soils such as trees promote the infiltration through their roots systems. Spatial and temporal monitoring of the terrace properties is mainly done by observation of soil quality and plant growth [6-7], but the soil saturated hydraulic conductivity K_s and soil sorptivity S are very rarely measured and only a few studies have investigated this point [8-9]. In Turkey, the hydraulic properties of the terraces are almost never measured. The main reason is that equipment transport at field, time and costs are often break on monitoring terrace hydraulic properties.

In the last decade, the development of experimental protocols as Beerkan infiltration experiments has made it possible to perform infiltration experiments quickly and cheaply [10]. For the processing of the experimental infiltration data, the two terms expansions [11] and Beerkan Estimation of Soil Transfer parameter (BEST) methods were widely used [12-14]. Recently and based on the work of Rahmati et al. [15], Moret-Fernandez et al. [16] proposed the four terms expansion of the Quasi Exact Implicit (QEI) infiltration formulation [11]. The latter is more accurate, but also more difficult to implement.

This paper proposes the assessment of infiltration capacity of terrace soil of Munzur University campus by estimating the saturated soil hydraulic conductivity K_s and the soil sorptivity S using 4 terms expansions of QEI formulation. For this purpose, a specific algorithm was coded using *lsrqsolve* function of Scilab free software [17]. A total of 8 beerkan infiltrations experiments and soils sampling were performed in terrace of Munzur University. Experimental Beerkan data were treated to estimate K_s and S .

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Theory

Haverkamp et al. [11] proposed the implicit analytical quasi exact infiltration (QEI) as follow (Equations 1-2):

$$\frac{2\Delta K^2}{S^2}t = \frac{1}{1-\beta} \left(\frac{2\Delta K}{S^2} (I_{3D}(t) - AS^2t - K_i t) - \ln \left(\frac{e^{\frac{2\beta\Delta K}{S^2}(I_{3D}(t) - AS^2t - K_i t)} + \beta - 1}{\beta} \right) \right) \quad (1)$$

$$A = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_i)} \quad (2)$$

Where t (T) is the time, S the soil sorptivity (L T^{-0.5}), I_{3D} is the three-dimensional cumulated infiltration (L), K_i is the initial soil hydraulic conductivity (L T⁻¹), ΔK is the difference between the saturated K_s (L T⁻¹) and the initial K_i (L T⁻¹) soil hydraulic conductivity, θ_s (L³ L⁻³, field-

saturated soil water content), θ_i ($L^3 L^{-3}$, initial soil water content), r (L) the radius of the infiltration ring. For relatively initial dry soils conditions $\theta_i < 0.25\theta_s$, γ and β are constants considered equal to respectively 0.75 and 0.6 [18]. Although QEI formulation is complex to solve, it has the advantage to be valid for the total infiltration experiment. For practical and simplicity reason, Haverkamp et al. [11] presented two terms expansions of QEI formulation to short and long times as follow (Equations 3-4):

$$I_{2T}(t) = S\sqrt{t} + \left(\frac{2-\beta}{3}K_s + AS^2\right) \cdot t \quad (3)$$

$$I_{2T+\infty}(t) = K_s \cdot t + \frac{S^2}{2\Delta K(1-\beta)} \ln \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

The use of the 2 terms expansion formulas especially with BEST methods are quite common [19]. However, the steady state must be reach and the transient formulation is only valid for short time. For relatively dry initial soil condition, where $K_i \sim 0$, Rahmati et al. [18] applied the Taylor series up to third order in power of $t^{0.5}$ to the QEI formulation (Equation 1) and presented the three terms approximate expansion as below (Equations 5):

$$I_{3T}(t) = I_{2T}(t) + \frac{1}{9}(\beta^2 - \beta + 1) \frac{K_s^2}{S} \cdot t^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Similarly, Moret-Fernandez et al. [16] proposed the 4-terms expansions respectively as follow (Equations 6):

$$I_{4T}(t) = I_{3T}(t) + \frac{2}{135}(\beta - 2)(\beta + 1)(1 - 2\beta) \frac{K_s^3}{S^2} \cdot t^2 \quad (6)$$

This formulation is almost valid from beginning of the infiltration process to the steady state attainment. The deviation from the QEI formulation appears after very long times which are in practice never reached in the field. Therefore, the 4-terms formula presents the advantage of avoiding transient time complicated iteration procedure which is used in the 2 terms formula.

2.2. Studied Site

The studied terrace soil is located at the campus of Munzur University in Turkey (Figure 1). For struggle erosion, pine trees were planted on the terrace. Long term goal aims to monitor hydraulics properties of the terrace section and effect of tree growth on soil structural properties and infiltration capacity. The studied soil is a rectangle surface of 15 meters longer and 3 meters width. The textural class of the soil is loamy sand.



Figure 1. Studied site of Munzur University Campus, google maps picture (2019)

Beerkan infiltration experiments and soil sampling were performed on 25-26 November 2019 (Figure 2).



Figure 2. Terrace soil plot studied with black pine tree

The soil specific density was measured with the pycnometer method to 2.50 g.cm^{-3} . The gravimetric water content was measured at three points (Figure 3) and mean value of 5.96% of dry mass was considered. For each Beerkan experiments, soil sampling was collected to determine the soil bulk density. The physical properties of studied soil are presented in Table 1.

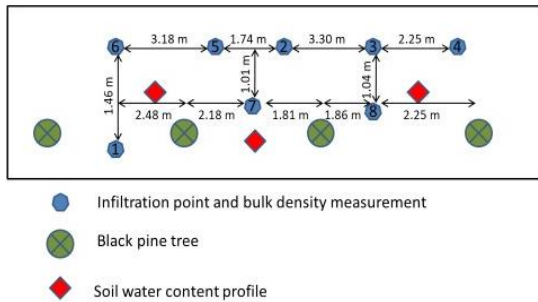


Figure 3. Soil sampling and Beerkan experiments

2.3. Beerkan Experiments and Treatment

At total of 8 Beerkan experiments were performed with a ring devise of 50.85 mm in radius. The cylinder ring was positioned at the soil surface and inserted to a depth of 1 cm to avoid lateral loss of ponded water. Several doses of water of same volume were prepared. The first dose was poured into the cylinder at time zero and the elapsed time required to complete infiltration was recorded. Then, the second dose was poured into the cylinder, and the time required to infiltrate was measured (in cumulative terms). This procedure was repeated for a series of 20 known volumes, the volumes were divided by the ring surface to compute the cumulative height of infiltrated water, this last being reported as a function of time to build the cumulative infiltration curves. Note that the ponder water height inside of the ring must not exceed 2-3 mm to respect the negative or null pressure head assumption made for the development of QEI formulation.

Table 1. Initial gravimetric water content and dry bulk density measurements

Water profil	Soil depth	ω_i [%]	Beerkan ID	Bulk density [g.cm^{-3}]
Point 1	0-5 cm	0,0420	1	1,379
	5-10 cm	0,0667	2	1,556
	10-15 cm	0,0727	3	1,455
Point 2	0-5 cm	0,0560	4	1,336
	5-10 cm	0,0695	5	1,271
	10-15 cm	0,0891	6	1,262
Point 3	0-5 cm	0,0339	7	1,605
	5-10 cm	0,0420	8	1,476
	10-15 cm	0,0647		

The fitting procedure of S and K_s parameter was coded using the Scilab function *lsqrsolve* (a least-squares procedure based on the Levenberg-Marquardt algorithm [20]). All the experimental data were used for the fitting procedure.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Cumulated Beerkan infiltration curves from terrace soil of Munzur university campus are illustrated in Figure 4. All infiltration curves present a concave part at the beginning and the steady state was reached for each experiment. The shorter experiment duration was 0.35 hour and the longest duration was 0.55 hour.

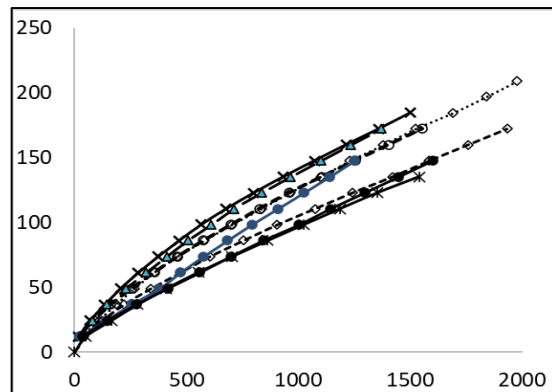


Figure 4. Cumulated Beerkan infiltration curves, horizontal axe belongs to time [s] and vertical axe belongs to the cumulated infiltrated water [mm]

An example of the infiltration curve and 4 terms model adjustment is shown for Beerkan experiment 1 (Figure 5). The model fitting with the experimental data were perfect for all the Beerkan experiments.

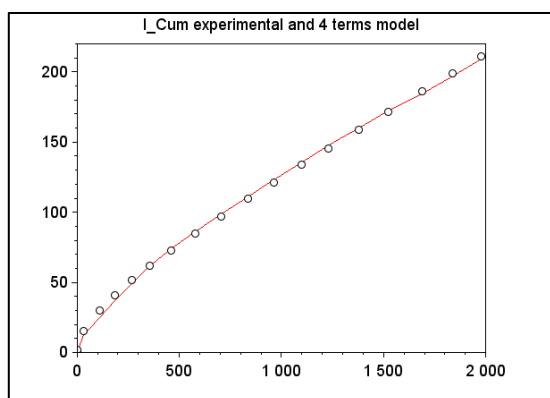


Figure 5. Model (red line) fitting with experimental data (circle), horizontal axe belongs to time [s] and vertical axe belongs the cumulated infiltrated water [mm]

Table 2 summarizes the estimates of S and K_s using 4 terms expansion formula and inversion procedure of Scilab. The mean value of sorptivity S and saturated hydraulic conductivity K_s of the studied section were respectively $2.1227 \text{ mm/s}^{0.5}$ with a standard deviation of 0.5854 and 0.0852 mm.s^{-1} with a standard deviation of 0.0112 . The highest K_s was observed for the more compacted zone (point 7) and meaning the presence of local macropore. Considering the soil variability in situ, the results of K_s were quite homogenous. However, S values were more spread out but still in the same range of values. Therefore, if we consider S and K_s as an indicator of the infiltration capacity of the terrace soil, the use of 4 terms expansion formula gives a robust estimation of the hydraulic properties of the terrace soil.

Concerning the black tree pine effect, no conclusion can be done at this stage since a long-time monitoring is necessary. In fact, as the trees were planted one month before the experiment, no effect of the roots in the soil matrix is expected. The next campaign infiltration will be conducted

for 2021 autumn season and then every two years the site will be monitored using Beerkan experiments to check K_s variability in time as done in other studies [21-22].

Table 2. S [$\text{mm.s}^{-0.5}$] and K_s estimates [mm.s^{-1}].

Beerkan ID	θ_i	θ_s	S	K_s
1	0,082	0,451	1,5784	0,0753
2	0,093	0,380	2,4575	0,0835
3	0,087	0,420	2,9913	0,0831
4	0,080	0,468	2,4163	0,0849
5	0,076	0,493	2,6161	0,0956
6	0,075	0,497	2,0109	0,0713
7	0,096	0,361	1,4078	0,1067
8	0,088	0,412	1,5035	0,0808

4. CONCLUSION

The soil sorptivity S and saturated hydraulic conductivity K_s of terrace soil of Munzur university campus were investigated using 4 terms expansion formula of Haverkamp implicit equation. Results gave consistent results showing homogenous value of K_s and slightly more spread-out value for S . However, a full hydraulic characterization of the terrace soil such as soil water retention curve and soil hydraulic conductivity curve need the estimation of textural parameter of the soil. For that, pedotransfer function is needed and use of BEST algorithms are more appropriate. The use of 4 terms in comparison to BEST do not require the attainment of the steady-state and therefore is time saving especially when the soil infiltration capacity is low. Also, the fit of the model with experimental data were perfect giving a high confidence to the estimated soil hydraulics parameters. Consequently, Beerkan infiltration experiments can be considered as a robust, less expensive, and rapid method when couple with the 4 terms formulation. However, the terrace effect on soil erosion and reduction of sediment in dam reservoir can be assess by comparison of runoff water mitigation of terrace with slope soils. Further research will be done to investigate the hydraulic effect of terrace on runoff water.

5. REFERENCES

1. Alexander, L.V., 2016. Global Observed Long-term Changes in Temperature and Precipitation Extremes: A Review of Progress and Limitations in IPCC Assessments and Beyond. *Weather and Climate Extremes*, 11, 4-16.
2. Berberoglu, S., Cilek, A., Kirkby, M., Irvine, B., Donmez, C., 2020. Spatial and Temporal Evaluation of Soil Erosion in Turkey Under Climate Change Scenarios Using the Pan-european Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) Model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 1-22.
3. Ozsoy, G., Aksoy, E., Dirim, M.S., Tumsavas, Z., 2012. Determination of Soil Erosion Risk in the Mustafakemalpaşa River Basin, Turkey, Using the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographic Information System, and Remote Sensing. *Environmental Management*, 50(4), 679-694.
4. Yuksel, A., Gundogan, R., Akay, A.E., 2008. Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaraş, Turkey. *Sensors*, 8(8), 4851-4865.
5. Kalkan, B., Taşdemir, C., Gökbulak, F., Tiryaki, O., 2017. Elazığ Yöresinde Seki Teraslarda Uygun Düşey Aralığın Belirlenmesi. *Ormançılık Araştırma Dergisi*, 4(2), 121-132.
6. Pekal, K., 2009. Artvin Çoruh Nehri Su Havzasında Erozyon Kontrolü Amaçlı Ağaçlandırma Çalışmalarının Değerlendirilmesi: Sümbüllü ve Salkımlı Yöresi Ağaçlandırma Çalışmaları. Master's Thesis, Artvin Çoruh Üniversitesi.
7. Taysun, A., Ünal, H. B., Şahin, A., Vurgun, H. Z., 2000. Determining the Efficiency of Forward-sloped Bench Terraces on Soil Conservation: The Case of the Aydın-Bozdoğan-Alamut Terracing Area. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 24(6), 729-736.
8. Posthumus, H., Stroosnijder, L., 2010. To Terrace or Not: the Short-term Impact of Bench Terraces on Soil Properties and Crop Response in the Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 12(2), 263-276.
9. Nie, W., Ma, X., Fei, L., 2017. Evaluation of Infiltration Models and Variability of Soil Infiltration Properties at Multiple Scales. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 589-599.
10. Braud, I., De Condappa, D., Soria, J.M., Haverkamp, R., Angulo-Jaramillo, R., Galle, S., Vauclin, M., 2005. Use of Scaled Forms of the Infiltration Equation for the Estimation of Unsaturated Soil Hydraulic Properties (The Beerkan Method). *European Journal of Soil Science*, 56(3), 361-374.
11. Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional Analysis of Infiltration from the Disc Infiltrometer: 2. Physically Based Infiltration Equation. *Water Resources Research*, 30(11), 2931-2935.
12. Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration Experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521-532.
13. Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D., Legret, M., 2010. Hydrodynamic Characterization of Basic Oxygen Furnace Slag Through an Adapted BEST Method. *Vadose Zone Journal*, 9(1), 107-116.
14. Bagarello, V., Di Prima, S., Iovino, M., 2014. Comparing Alternative Algorithms to Analyze the Beerkan Infiltration Experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 78(3), 724-736.
15. Rahmati, M., Latorre, B., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Moret-Fernández, D., 2019. The Relevance of Philip Theory to Haverkamp Quasi-exact Implicit Analytical Formulation and its Uses to Predict Soil Hydraulic Properties. *Journal of Hydrology*, 570, 816-826.
16. Moret-Fernández, D., Latorre, B., López, M. V., Pueyo, Y., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Rahmati, M., Tormo, J., Nicolau, J.M., 2020. Three-and Four-term Approximate Expansions of the Haverkamp Formulation to Estimate Soil Hydraulic Properties from Disc

- Infiltrometer Measurements. *Hydrological Processes*, 34(26), 5543-5556.
17. Campbell, S.L., Chancelier, J.P., Nikoukhah, R., 2010. Modeling and Simulation in SCILAB. In *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4*. Springer, New York, NY, 73-106.
 18. Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Di Prima, S., Gosset, A., Iovino, M., Lassabatere, L., 2019. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters (BEST) Across Soils and Scales. *Journal of Hydrology* 576, 239–261.
 19. Yilmaz, D., 2021. Alternative α^* Parameter Estimation for Simplified Beerkan Infiltration Method to Assess Soil Saturated Hydraulic Conductivity. *Eurasian Soil Science*, 54(7).
 20. Marquardt, D., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11,431-441.
 21. Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D., Legret, M., 2013. Influence of Carbonation on the Microstructure and Hydraulic Properties of a Basic Oxygen Furnace Slag. *Vadose Zone Journal*, 12(2), vzt2012-0121.
 22. Yilmaz, D., Cannavo, P., Séré, G., Vidal-Beaudet, L., Legret, M., Damas, O., Peyneau, P.E., 2018. Physical Properties of Structural Soils Containing Waste Materials to Achieve Urban Greening. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 442-455.

3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Muhammed Safa KAMER^{*1}, Oğuz DOĞAN¹, Şemsettin TEMİZ²,
Hakan YAYKAŞLI³

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Kahramanmaraş

²İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya

³Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 25.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin bilinmesi tasarımcılar ve kullanıcılar için büyük önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemine ait, üretim parametrelerinden nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni değişiminin, eğilmeye karşı olan etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. ABS ve PLA malzemeler kullanılarak farklı üretim parametrelerine sahip deney numuneleri üç boyutlu yazıcılar ile üretilmiştir. Üretilen numuneler üç noktalı eğme testine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda her bir parametrenin etkisinin gözlemlenmesi için kuvvet-sehim eğrileri oluşturulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç olarak PLA malzemesinin eğilme dayanımının ABS malzemeye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca PLA malzemesi için nozul sıcaklığının düşmesi ile eğilme dayanımının da büyük oranda düştüğü tespit edilmiştir. Dolgu deseni değişiminin, hem ABS hem de PLA malzemesi için eğilme dayanımını kayda değer oranda değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Erimiş yığıma modellemesi (EYM), 3B Yazıcı, Eğme testi, Dolgu deseni, Nozul ve tabla sıcaklığı

Investigation of the Mechanical Properties of Flexural Test Samples Produced Using Different Printing Parameters with a 3D Printer

Abstract

Definition of the mechanical properties of the parts produced by the additive manufacturing method is of great importance for designers and users. In this study, the effects of the production parameters of the additive manufacturing method, such as nozzle, table temperature, and the variation of the filling pattern

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Muhammed Safa KAMER, msafakamer@ksu.edu.tr

on flexural strength, are experimentally investigated. The test samples with different production parameters using ABS and PLA materials are produced with 3D printers. The produced samples are subjected to the three-point flexural test. As a result of the experiments, force-deflection curves are created. The effects of each parameter, and the results are evaluated. It has been determined that PLA is generally more durable in flexural strength than ABS. In addition, it is determined that the change of nozzle temperature for PLA material considerably changed its mechanical properties. The infill pattern change significantly changed the mechanical properties of both PLA and ABS material.

Keywords: Additive manufacturing, Fused deposition modeling (FDM), 3D Printer, Flexural test, Infill pattern, Printing and bed temperature

1. GİRİŞ

Üç boyutlu üretim tekniği, üretilecek parçanın tek parça halinde katman katman işlenerek üretilmesi mantığına dayanan bir üretim metodu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu üretim tekniğinde hammaddenin ısıtılarak akışkan hale getirilerek ve bir nozuldan geçirilerek üretilecek olan parçanın katmanlar halinde üretilmesi sağlanır. Geliştirilen bu yeni üretim tekniği sayesinde geleneksel üretim yöntemleri ile tek aşamada üretilmeyecek olan ürünler kolaylıkla üretilebilir hale gelmiş ve üç boyutlu üretim tekniği gün geçtikçe pratik yaşamda da önemini arttırmaya başlamıştır. Ngo ve arkadaşları [1] kapsamlı derleme çalışmalarında eklemeli üretimin avantajlarını; tasarım özgürlüğü, kişiselleştirme, atık minimizasyonu, karmaşık yapıları üretme yeteneği olarak sıralamaktadır.

Önemi her geçen gün artan bu teknoloji ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenerek belirlenmesi son yıllarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi ile karşılanmıştır. Literatür incelendiğinde özellikle son yıllarda, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik birçok farklı çalışmanın olduğu görülmektedir. Popescu ve arkadaşları [2] FDM üretim parametrelerinin polimer test numunelerinin mekanik özelliklerine olan etkilerini derleme çalışmalarını kapsamlı olarak özetlemişlerdir. Eklemeli üretim ile üretilen malzemeler için en belirleyici mekanik özelliklerin çekme, basma, eğilme ve darbe dayanımları olduğu vurgulanmaktadır.

Mekanik özellikler özelinde incelediğimiz literatürde en fazla farklı üretim parametrelerinin çekme dayanımı üzerine olan etkisinin incelendiği

görülmektedir. Jayanth ve arkadaşları [3] eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ABS malzemesi için kimyasal işlemlerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Kimyasal işlem sonucunda daha yüzey pürüzlülüğü elde edilmesine karşın, daha kötü çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. Rajpurohit ve arkadaşları [4] tarama açısı, genişliği ve katman yüksekliği yüksekliğinin çekme dayanımına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Tarama açısı 0° olduğunda en yüksek 90° olduğunda en düşük çekme dayanımları elde edilmiştir. Üç boyutlu yazdırma işleminde bazı malzemelere takviye eklemeleri yapılarak malzemelerin mekanik davranışları incelenmiştir. Bakır ve karbon fiber eklenmiş PLA malzemesinin, eklenmemiş malzemeye göre çekme dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir [5]. Ayrıca bazı çalışmalarda ise, sağ ve sol yarıları farklı renklerde üretilen PLA çekme numunelerinin yapıştırma bağı ile bağlanarak çekme testine tabi tutulmuş ve yapıştırma dayanımı tespit edilmiştir [6]. Rodríguez-Panes ve arkadaşları [7] PLA ve ABS test numunelerinin mekanik performansı üzerindeki katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve katman yöneliminin etkisini deneysel olarak karşılaştırmıştır. Tüm parametreler için PLA kullanılarak üretilen test numuneleri daha rijit bir performans sergilemiştir ayrıca ABS'den daha fazla çekme mukavemetine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen polimerlerin darbe dayanımlarının incelenmesine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Tezel ve arkadaşları [8] ABS, PLA, PET-G ve PC malzemeleri için, farklı katman yüksekliği ve

üretim açılarının darbe dayanımına olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Sood ve arkadaşları [9] FDM metodu ile üretilen test numunelerinin çekme, eğilme ve darbe dayanımları deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, beş farklı tasarım parametresinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçlar ile ampirik ifadeler elde edilmiş ve varyans analizi yapılarak doğrulanmıştır. Eklemeli imalat yönteminde kontrol edilebilir bir diğer parametre ise dolgu oranı ve deseni olarak karşımıza çıkmaktadır. Liu ve arkadaşları [10] farklı dolgu oranlarının TPE malzemesinden üretilen çekme numunelerinin dayanımına olan etkisini nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Dolgu yoğunluğunun artması ile birlikte çekme dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Tatlı ve arkadaşları [11] çalışmalarında kendi tasarlayıp ürettikleri üç boyutlu bir yazıcıda farklı dolgu geometrilerinin çekme eğilme ve Charpy darbe mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Izgara geometrisinin maksimum çekme kuvvetine, geoid dolgunun maksimum eğilme dayanımına sahip olduğu tespit edilirken darbe yüküne karşı kayda değer bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Akhoundi ve arkadaşları [12] üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş farklı dolgu desenlerinin çekme ve eğilme dayanımına olan etkisini deneysel olarak incelemiştir.

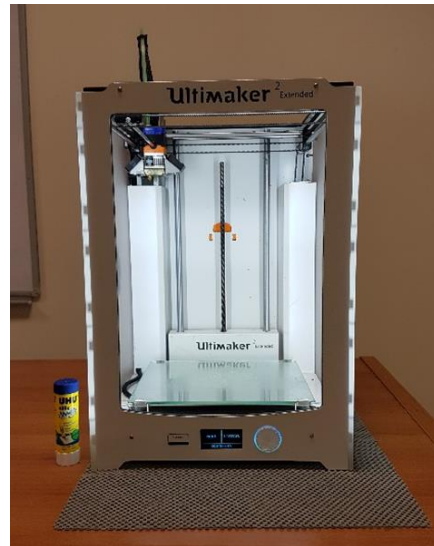
Üç boyutlu yazıcılar ile üretilen numunelerin literatürde karşılaşılan bir diğer önemli testi ise basma testi olarak karşımıza çıkmaktadır. Haldar ve arkadaşları [13] PLA malzemeden üretilmiş 3D baskılı oluklu çekirdek tasarımına sahip sandviç yapıların sıkıştırma davranışı deneysel olarak incelemiştir. Solmaz ve arkadaşları [14] petek hücrelerinin üretiminde üç boyutlu yazıcı ile üretilen PLA ve ABS kullanılan altıgen yapıları sandviç yapıların basma dayanımlarını deneysel olarak incelemiştir. Farklı hücre boyutu ve farklı hücre yüksekliğine sahip yapılar testlerde kullanılmıştır. Maksimum dayanım 7 mm hücre boyutu ve 25 mm hücre yüksekliğinde elde edilmiştir. Chacon ve arkadaşları [15] eklemeli imalat yöntemi ile PLA malzemeden üretilen yapılar için, farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve üç nokta eğilme testleri

uygulanmıştır. Katman katman üretim nedeniyle, 3 boyutlu yazdırılan yapıların anizotropik davranış sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, dikey yönlendirme için katman kalınlığı arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiği ve ilerleme hızı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcıda ABS ve PLA malzeme ile farklı dolgu desenleri, farklı nozul ve tabla sıcaklıkları kullanılarak eğme test numuneleri üretilmiştir. Dolgu deseninin, nozul ve tabla sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri ölçülmüş ve üretilen numunelere eğme testi yapılmıştır. Eğme testleri sonucunda kuvvet-sehim eğrileri elde edilmiş ve farklı tasarım parametreleri için eğilme dayanımları kıyaslanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında kullanılan 3 boyutlu yazıcı ve üretilen test numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemede Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi ÜSKİM imkânları kullanılmıştır. Test numunelerinin üretiminde “Ultimaker 2 Extended” [16-17] 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Test numunelerinin üretiminde kullanılan Ultimaker 2 Extended 3B yazıcı

Eğme test numunelerinin boyutlandırılmasında ASTM D790-17 standardı [18] kullanılmıştır. Belirtilen standart ölçülerindeki eğme test numunesi 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında SolidWorks CAD yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.

2.1. Farklı Nozul ve Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Kullanılan filament (ABS filament ve PLA filament), yazdırma nozul ve tabla sıcaklıkları değiştirilerek ABS malzemede 5 farklı nozul sıcaklığı (80 °C sabit tabla sıcaklığında; 260 °C, 250 °C, 240 °C, 230 °C, 220 °C) ve 6 farklı tabla sıcaklığı (260 °C sabit nozul sıcaklığında; 80 °C, 70 °C, 60 °C, 50 °C, 40 °C, 30 °C), PLA malzemede ise 6 farklı nozul sıcaklığı (60 °C sabit tabla sıcaklığında; 240 °C, 230 °C, 220 °C, 210 °C, 200 °C, 190 °C) ve 4 farklı tabla sıcaklığı (240 °C sabit nozul sıcaklığında; 60 °C, 50 °C, 40 °C, 30 °C) kullanılarak eğme test numuneleri üretilmiştir. Ultimaker ABS malzeme ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı 225-260°C, Ultimaker PLA malzeme ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı 195-240°C'dir. Her farklı parametre için dörder adet olacak şekilde, ABS malzeme ile 40 adet ve PLA malzeme ile 36 adet test numunesi üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda farklı nozul ve tabla sıcaklıklarında ABS ve PLA malzeme kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

SolidWorks CAD yazılımı ile 3 boyutlu olarak tasarımı yapılan eğme test numunesinin G-kodlarının oluşturulmasında Ultimaker markasının kendi yazılımı olan Cura CAM yazılımı kullanılmıştır. Tasarımın yazıcı tablası üzerindeki konumu, açısı vb. ayarlar yapıldıktan sonra Çizelge 1'de belirtilen parametreler seçilerek tasarımın G-kodları oluşturulmuştur. Oluşturulan G-kodları SD kart yardımıyla 3 boyutlu yazıcıya aktarılmıştır.

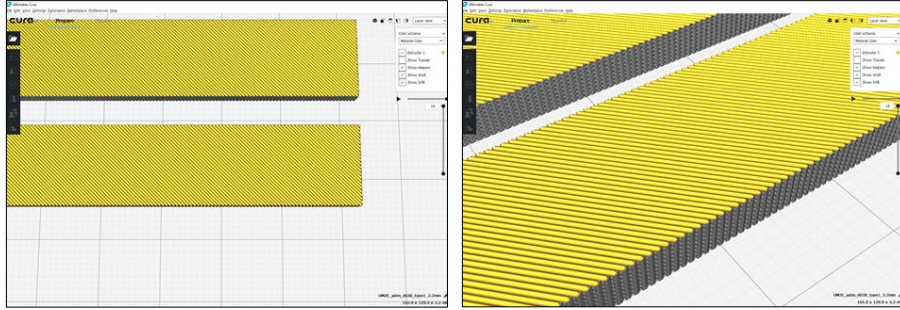
ABS malzeme ile eğme test numunesi üretiminde öncelikle 3 boyutlu yazıcıda yazdırma tablasının manuel olarak kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya Ultimaker marka ABS malzeme [19-20] takılmıştır. 3 boyutlu yazıcının yazdırma tabla ve nozul sıcaklığı yukarıda belirtilen değerlere ayarlanmıştır.

Çizelge 1. Farklı nozul ve tabla sıcaklığı çalışmaları için Cura CAM yazılımında seçilen parametreler

Yazıcı	Ultimaker 2 extended with olsson block
Malzeme	Ultimaker ABS veya ultimaker PLA
Nozul çapı	0,4 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0 mm
Üst/Alt kalınlığı	0 mm
Dolgu yoğunluğu	%100
Dolgu deseni	Lines 0° (Şekil 2)
Yazdırma hızı	60 mm/s
Boşta gezme hızı	120 mm/s

PLA malzeme ile eğme test numunesi üretiminde öncelikle 3 boyutlu yazıcıda yazdırma tablasının manuel olarak kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya Ultimaker marka PLA malzeme [21-22] takılmıştır. 3 boyutlu yazıcının yazdırma tabla ve nozul sıcaklığı yukarıda belirtilen değerlere ayarlanmıştır.

Üretim işlemini başlatmadan önce, üretim sırasında numunenin ilk katmanının cam yazdırma tablasına daha iyi yapışmasını sağlamak için yazdırma tablası üzerine ince bir film tabakası kalınlığından yapıştırıcı (Uhu Stic Magic Blue) sürülmüştür.



Şekil 2. Cura CAM programında seçilen Lines 0° dolgu deseni görüntüleri

2.2. Farklı Dolgu Desenleri Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

5 farklı dolgu deseni (Lines 0°-Lines 90° Connect-Lines 180°-Concentric-Zig Zag) kullanılarak her parametre için dörder adet olacak şekilde, 20 adet ABS ve 20 adet PLA malzeme ile toplam 40 adet test numunesi üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda aynı parametrelerde ABS ve PLA malzeme kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

SolidWorks CAD yazılımı ile 3 boyutlu olarak tasarımı yapılan eğme numunesinin G-kodlarının oluşturulmasında Ultimaker markasının kendi yazılımı olan Cura CAM yazılımı kullanılmıştır. Tasarımın yazıcı tablası üzerindeki konumu, açısı vb. ayarlar yapıldıktan sonra Çizelge 2’de belirtilen parametreler seçilerek tasarımın G-kodları oluşturulmuştur. G-kodlarının oluşturulmasında belirtilen parametrelerden sadece dolgu deseni (Lines 0°-Lines 90° Connect-Lines 180°-Concentric-Zig Zag) değiştirilerek farklı G-kodları oluşturulmuştur. Cura CAM programında seçilen dolgu deseni görüntüleri Şekil 3’de gösterilmiştir. Oluşturulan G-kodları SD kart yardımıyla 3 boyutlu yazıcıya aktarılmıştır.

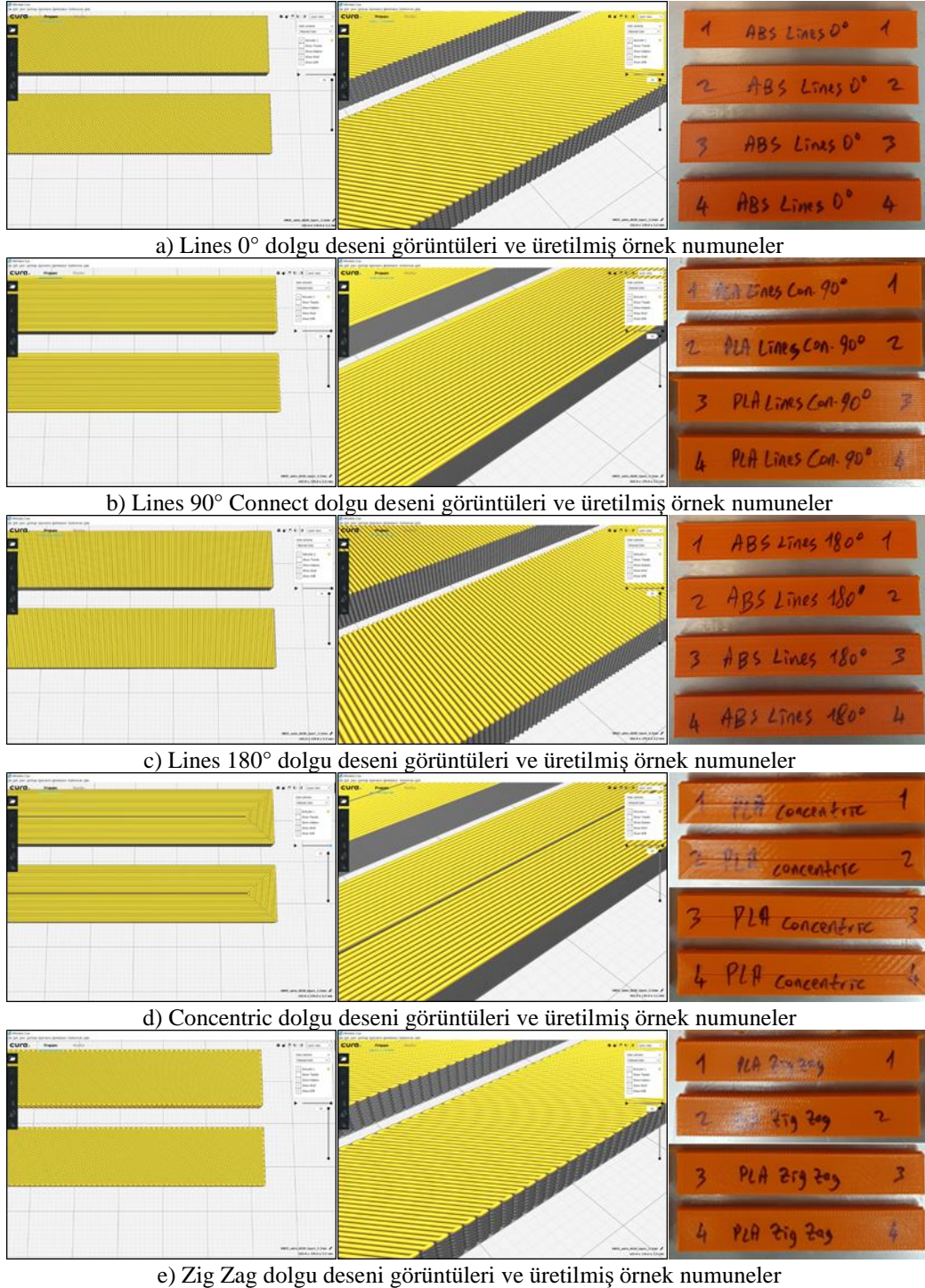
Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcıda öncelikle baskı tablasının manuel olarak kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya Ultimaker marka ABS malzeme [19-20] veya Ultimaker marka PLA malzeme [21-22] takılmıştır. Tüm eğme numuneleri bu malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcının baskı tablasının sıcaklığı ABS malzeme kullanıldığında 80°C’ye, PLA malzeme

kullanıldığında ise 60 °C’ye (Ultimaker ABS ve PLA malzemelerin ürün etiketlerinde belirtilen değere) ayarlanmıştır. ABS malzeme kullanılırken 3 boyutlu yazıcının nozul sıcaklığı 260 °C’ye (225-260 °C Ultimaker ABS ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı) ayarlanmıştır. PLA malzeme kullanılırken 3 boyutlu yazıcının nozul sıcaklığı 240 °C’ye (195-240 °C Ultimaker PLA ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı) ayarlanmıştır. Üretim işlemi başlamadan önce, üretim sırasında numunenin ilk katmanının cam yazdırma tablasına daha iyi yapışmasını sağlamak için yazdırma tablası üzerine ince bir film tabakası kalınlığında stick yapıştırıcı (Uhu Stic Magic Blue) sürülmüştür. ABS ve PLA malzemeler kullanılarak üretilen numunelerin bir kısmı Şekil 3’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Farklı dolgu deseni çalışmaları için Cura CAM yazılımında seçilen parametreler

Yazıcı	Ultimaker 2 Extended with olsson block
Malzeme	Ultimaker ABS veya ultimaker PLA
Nozul çapı	0,4 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0 mm
Üst/alt kalınlığı	0 mm
Dolgu yoğunluğu	% 100
Dolgu deseni	Lines 0°-Lines 90° Connect-Lines 180°-Concentric-Zig Zag (5 farklı dolgu deseni kullanılarak test numuneleri üretilmiştir)
Yazdırma hızı	60 mm/s
Boşta gezme hızı	120 mm/s

3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi



Şekil 3. Cura CAM programında seçilen dolgu deseni görüntüleri ve üretilmiş örnek numuneler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcıda ABS ve PLA malzeme ile farklı dolgu desenleri, farklı nozul ve tabla sıcaklıkları kullanılarak eğme test numuneleri üretilmiştir. Dolgu deseninin, nozul ve tabla sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

3.1. Farklı Nozul ve Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Veriler

Farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak ABS ve PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütle değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak ABS ve PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütlelerinde kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Çizelge 3’de görülen küçük kütle farklılıklarının numuneler üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları, üretim sırasındaki buharlaşma miktarı gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 3. Farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak üretilen test numunelerinin kütle değerleri

Filament türü	Nozul sıcaklığı (C°)	Tabla sıcaklığı (C°)	Ölçülen değerler
			Ortalama kütle (g)
ABS	260	80	3,71
ABS	260	70	3,70
ABS	260	60	3,66
ABS	260	50	3,70
ABS	260	40	3,48
ABS	260	30	3,53
PLA	240	60	3,85
PLA	240	50	3,82
PLA	240	40	3,88
PLA	240	30	3,91

Farklı nozul ve tabla sıcaklıkları kullanılarak ABS ve PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütle değerleri Çizelge 3 ve Çizelge 4’de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde Cura CAM programından

alınan filament boyu verilerinin tüm numuneler için aynı olduğu görülmektedir. Bu da programda hesaplanan yazdırma için gerekli olan malzeme miktarının her malzeme için tüm renklerde aynı olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 4. Farklı nozul sıcaklıkları kullanılarak üretilen test numunelerinin kütle değerleri

Filament türü	Nozul sıcaklığı (C°)	Tabla sıcaklığı (C°)	Ölçülen değerler
			Ortalama kütle (g)
ABS	260	80	3,71
ABS	250	80	3,51
ABS	240	80	3,70
ABS	230	80	3,54
ABS	220	80	3,76
PLA	240	60	3,85
PLA	230	60	3,83
PLA	220	60	3,74
PLA	210	60	3,40
PLA	200	60	3,39
PLA	190	60	2,80

Farklı nozul sıcaklıkları kullanılarak ABS ve PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütle değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak ABS malzeme ile üretilen numunelerin kütlelerinde kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Fakat nozul sıcaklığının azalmasıyla PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütlelerinin de benzer şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak; nozul sıcaklığının azalmasıyla PLA filamentin nozul içerisinde yeteri kadar erimeye fırsat bulamadan ittirilmesi gerektiğinden, ABS filamentte göre daha sert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olan PLA filamentin, filament besleme motorunda bir miktar kaydırmaya (patinaj) neden olduğu söylenebilir. Bu da sonuç olarak üretilen PLA eğme test numunelerinde kütle kaybı olarak karşımıza çıkmaktadır.

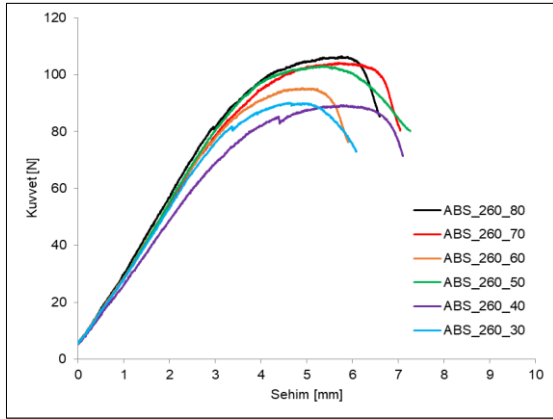
Şekil 4’de her iki malzeme ile farklı nozul ve tabla sıcaklıklarında üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrileri verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, farklı

3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

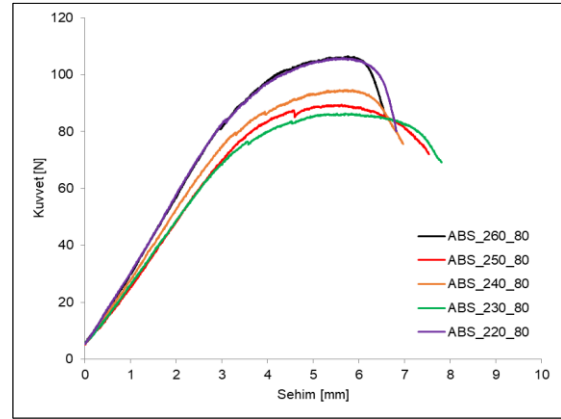
nozul ve tabla sıcaklıklarında ABS malzeme kullanılarak üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu söylenebilir. Şekil 4'de ABS malzeme kuvvet-sehim eğrilerinde görülen küçük farklılıkların numuneler üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları, üretim sırasındaki buharlaşma miktarı gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4c incelendiğinde, farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak PLA malzeme ile üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrilerinin birbiriyle çakışık olduğu görülmektedir. Fakat farklı nozul sıcaklıkları kullanılarak PLA malzeme ile üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrileri (Şekil 4d)

incelendiğinde, nozul sıcaklığının azalmasıyla eğilme dayanımlarının azaldığı ve sehim miktarlarının ise arttığı görülmektedir.

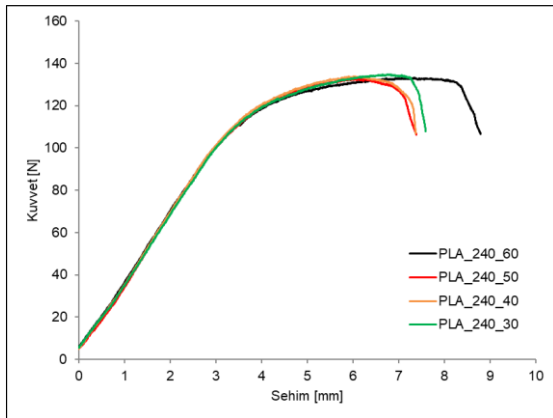
ABS ve PLA malzemeler ile üretilen test numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında, PLA malzeme ile üretilen numunelerin eğilme dayanımlarının genel olarak ABS malzeme ile üretilen numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatür incelendiğinde benzer sonuçların Rodríguez-Panes ve arkadaşları [7] yapmış oldukları çalışmada da görmek mümkündür.



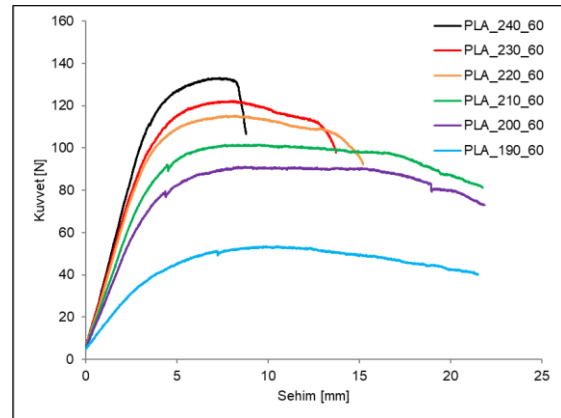
a) ABS malzeme tabla sıcaklığı değişimi



b) ABS malzeme nozul sıcaklığı değişimi



c) PLA malzeme tabla sıcaklığı değişimi



d) PLA malzeme nozul sıcaklığı değişimi

Şekil 4. Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin kuvvet-sehim eğrileri

3.2. Farklı Dolgu Desenleri Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Veriler

Farklı dolgu desenleri kullanılarak ABS ve PLA malzemelerle üretilen numunelerin kütle değerleri Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde farklı dolgu desenleri kullanılarak ABS ve PLA filamentlerle üretilen numunelerin kütlelerinde dolgu deseninin değişimine bağlı olarak kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Çizelge 5’de görülen küçük kütle farklılıklarının numuneler üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları, üretim sırasındaki buharlaşma miktarı gibi etkenlerden kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 5’de her iki malzeme ile farklı dolgu desenleri kullanılarak üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrileri verilmiştir. Şekil 5a incelendiğinde, Lines 180° dolgu deseni kullanılarak ABS malzeme ile üretilen numunelerin gevrek malzeme gibi bir davranış sergilediği, akma olmadan malzemenin koptuğu görülmektedir. ABS malzeme ile Lines 90° Connect ve Concentric dolgu desenleriyle üretilen numunelerin en yüksek eğilme dayanımına ve en yüksek sehim miktarına sahip dolgu tipleri olduğu ve bu dolgu desenlerine sahip numunelerin kuvvet-sehim eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu söylenebilir. ABS malzeme ile Lines 0° ve Zig Zag dolgu desenleriyle üretilen numunelerin kuvvet-sehim eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu görülmektedir.

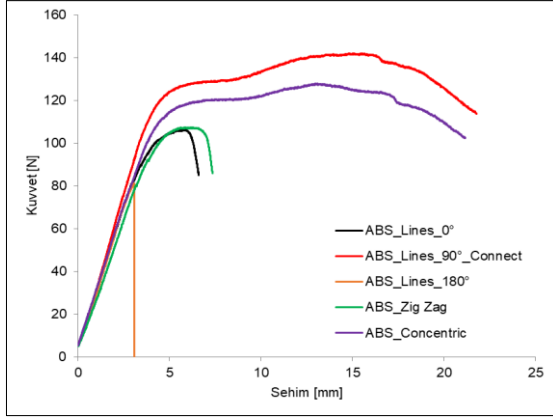
Şekil 5b incelendiğinde, Lines 180° dolgu deseni kullanılarak PLA malzeme ile üretilen numunelerin gevrek malzeme gibi bir davranış sergilediği görülmektedir. PLA malzeme ile Lines 90° Connect ve Concentric dolgu desenleriyle üretilen numunelerin en yüksek eğilme dayanımına sahip dolgu tipleri olduğu ve bu dolgu desenlerine sahip numunelerin kuvvet-sehim eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu söylenebilir. PLA malzeme ile Lines 0° ve Zig Zag dolgu desenleriyle üretilen numunelerin kuvvet-sehim

eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu ve bu dolgu desenlerinin en yüksek sehim miktarına sahip desenler olduğu görülmektedir. Dezaqi ve arkadaşları [23] ve Tatlı ve arkadaşları [11] gerçekleştirdikleri çalışmalarda dolgu deseninin mekanik özellikler üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde, bu çalışmada elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

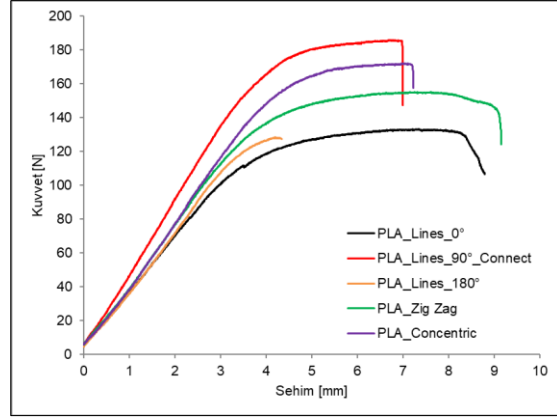
Çizelge 5. Farklı dolgu desenleri kullanılarak üretilen test numunelerinin kütle değerleri

Filament türü	Dolgu deseni	Nozul sıcaklığı (C°)	Tabla sıcaklığı (C°)	Ölçülen değerler
				Ortalama kütle (g)
ABS	Lines 0°	260	80	3,71
ABS	Lines 90° Connect	260	80	3,75
ABS	Lines 180°	260	80	3,71
ABS	Concentric	260	80	3,69
ABS	Zig Zag	260	80	3,69
PLA	Lines 0°	240	60	3,85
PLA	Lines 90° Connect	240	60	3,98
PLA	Lines 180°	240	60	3,92
PLA	Concentric	240	60	3,82
PLA	Zig Zag	240	60	3,93

ABS ve PLA malzemeler ile üretilen ürünlerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri kendi aralarında kıyaslandığında, PLA malzeme ile üretilen numunelerin genel olarak eğilme dayanımlarının ABS malzemeye göre daha yüksek, sehim miktarlarının ise ABS malzemeye göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar literatürde birçok çalışmada görülmektedir [1,2,7].



a) ABS malzeme dolgu deseni değişimi



b) PLA malzeme dolgu deseni değişimi

Şekil 5. Farklı dolgu desenleri kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin kuvvet-sehim eğrileri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş farklı üretim parametrelerine sahip eğme deney numunelerinin eğilme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Nozul, tabla sıcaklıkları ve dolgu desenleri farklılık gösteren PLA ve ABS malzemeden üretilmiş eğme numuneleri deneylerde kullanılmıştır. Her bir numune üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuş ve kuvvet-sehim eğrileri elde edilerek, her bir numunenin eğilme dayanımları test edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ABS malzeme ile üretilen deney numunelerinde nozul ve tabla sıcaklığının değişimi ile eğilme dayanımları üzerinde en fazla %15'lik bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle ABS malzemesi için nozul ve tabla sıcaklıkları değişimin eğilme dayanıma çok fazla etki etmediği tespit edilmiştir.
- PLA malzeme ile üretilen deney numunelerinde tabla sıcaklığının değişimi eğilme dayanımını hemen hiç etkilemezken, nozul sıcaklığının azalması ile eğilme dayanımının hızlı bir şekilde düştüğü ancak malzemenin daha bir sünek yapıya kavuştuğu belirlenmiştir.

- Line_90°_Connect ve Concentric dolgu desenlerine sahip deney numunelerinin en yüksek eğilme dayanımlarına sahip olduğu, Lines_180° dolgu desenine sahip numunelerin en düşük eğilme dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan sonra, benzer üretim parametreleri ile üretilen, çekme, basma veya darbe numunelerinin dayanımları incelenerek, üç boyutlu yazdırma parametrelerinin malzemenin farklı mekanik özelliklerine olan etkisi incelenecektir. Ayrıca elde edilen eğriler sonlu elemanlar analiz programlarına tanımlanarak farklı geometriye sahip yapılar için yapısal analizler gerçekleştirilebilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-2351 nolu proje ile desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., 2018. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges, Composites Part B, 143, 172-196.

2. Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R., 2018. Process Parameters Influence Over the Mechanical Properties of Polymer Specimens: A Review. *Polymer Testing*, 69, 157-166.
3. Jayanth, N., Senthil, P., Prakash, C., 2018. Effect of Chemical Treatment on Tensile Strength and Surface Roughness of 3D-printed ABS Using the FDM Process. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 155-163.
4. Rajpurohit, S.R., Dave, H.K., 2019. Analysis of Tensile Strength of a Fused Filament Fabricated PLA Part Using an Open-source 3D Printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1525-1536.
5. Uzun, M., Erdoğan, Y.E., 2020. Eriyik Yığılma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 2800-2808.
6. Ando, M., Biroş, M., Jeganmohan, S., 2021. Surface Bonding of Additive Manufactured Parts from Multi-colored PLA Materials. *Measurement*, 169, 108583.
7. Rodríguez-Panes, A., Claver, J., Camacho, A.M., 2018. The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials*, 11(1333), 1- 21.
8. Tezel, T., Ozenc, M., Kovan, V., 2021. Impact Properties of 3D-printed Engineering Polymers. *Materials Today Communications*, 26, 102161.
9. Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., 2010. Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts. *Materials and Design*, 31, 287-295.
10. Liu, C.H., Chen, Y., Yang, S.Y., 2021, Quantification of Hyperelastic Material Parameters for a 3D-Printed Thermoplastic Elastomer with Different Infill Percentages. *Materials Today Communications*, 26, 101895.
11. Tatlı, O., Özgül, H.G., 2020. Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, İmalatı ve Dolgu Geometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Icontech International Journal of Surveys. Engineering, Technology*, 4, 1, 13-24.
12. Akhoundi, B., Behraves, A.H., 2019. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics*, 59, 883-897.
13. Haldar, A.K., Managuli, V., Munshi, R., Agarwal, R.S., Guan, Z.W., 2021. Compressive Behaviour of 3D Printed Sandwich Structures Based on Corrugated Core Design. *Materials today communications*, 26, 101725.
14. Solmaz, M.Y., Çelik, E., 2018. 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yükü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 30, 1, 277 – 286.
15. Chacon, J.M., Caminero, M.A., Garcia-Plaza, E., Nunez, P.J., 2017. Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection. *Materials and design*, 124, 143 -157.
16. The Ultimaker 2 Extended Specifications, (n.d.). Erişim Adresi: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987939-The-Ultimaker-2-Extended-specifications> (Erişim Tarihi: 06.02.2021).
17. The Ultimaker 2 Extended User Manual, (n.d.). Erişim Adresi: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987819-The-Ultimaker-2-Extended-user-manual> (Erişim Tarihi: 06.02.2021).
18. ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org, <https://doi.org/10.1520/D0790-17>.
19. Ultimaker ABS SDS, (2017). Erişim Adresi: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962900-Ultimaker-ABS-SDS> (Erişim Tarihi: 15.02.2021).
20. Ultimaker ABS TDS, (2018). Erişim Adresi: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS> (Erişim Tarihi: 15.02.2021).

3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

- 21.** Ultimaker PLA SDS, (2019). Erişim Adresi:
<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759359-Ultimaker-PLA-SDS>
(Erişim Tarihi: 15.02.2021).
- 22.** Ultimaker PLA TDS, (2018). Erişim Adresi:
<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS>
(Erişim Tarihi: 15.02.2021).
- 23.** Dezaki, M.L., Ariffin, M.K.A.M., 2020. The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process, *Polymers*, 12, 1-20.

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, yıl, makalenin tam başlığı, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, yıl, kitabın tam adı, cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, yıl, bildirinin tam başlığı, konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, yıl, bildirinin adı, konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

Tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, yıl, tezin adı, derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, yıl, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün, ay, yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün, ay, yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün, ay, yıl.